

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

**GÜNEŞ ENERJİSİNİN MEKÂN ISITMASI AMACIYLA
DUYULUR ISI DEPOLAMA MALZEMELERİNDE VE FAZ
DEĞİŞTİREN MADDELERDE DEPOLANMASININ
İNCELENMESİ**

KEMAL ÜÇLER

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

GÜNEŞ ENERJİSİNİN MEKÂN ISITMASI AMACIYLA
DUYULUR ISI DEPOLAMA MALZEMELERİNDE VE FAZ
DEĞİŞTİREN MADDELERDE DEPOLANMASININ
İNCELENMESİ

KEMAL ÜÇLER

Prof. Dr. Kadri Süleyman YİĞİT
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Doç. Dr. Ali KİBAR
Eş Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Murat HOŞÖZ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Elif ÖĞÜT
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Doç. Dr. Cenk ÇELİK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Yaşar ŞEN
Jüri Üyesi, Düzce Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Ünal UYSAL
Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi


.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 05.02.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Zengin enerji kaynaklarına sahip olmasına rağmen bunlardan yararlanmadaki yetersizlik ve verimsizlik, ülkemizin gelişmesi önündeki en büyük engellerden biridir. Bu konuda yapılacak çalışmalar ve iyileştirmeler büyük önem arz etmektedir. Yaptığımız bu çalışmayla ülkemizin bu sorununa katkı sağlamak en büyük arzumuzdur.

Tez çalışmamın her aşamasında büyük emeği olan, hiçbir zaman desteğini esirgemeyen danışmanlarım, değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Kadri Süleyman YİĞİT'e ve Sayın Doç. Dr. Ali KİBAR'a, çalışmamın gelişmesinde büyük katkıları olan tez izleme komitesi üyeleri; Sayın Prof. Dr. Murat HOŞÖZ ve Sayın Doç. Dr. Cenk ÇELİK hocalarıma, beni büyütüp, yetiştiren-okutan kıymetli anneme ve babama, doktora eğitimim sırasında sabırlarını esirgemeyen sevgili eşime ve kızlarım Ahsen ve Asya'ya, bu çalışmayı 2014/007 numaralı projeye destekleyen Kocaeli Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimine teşekkür ederim.

Ocak-2019

Kemal ÜÇLER

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLolar DİZİNİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ÖZET.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
GİRİŞ.....	1
1. GÜNEŞ.....	4
1.1. Güneşin Yapısı ve Gün Işığı.....	4
1.2. Türkiye'nin Güneş Enerji Potansiyeli.....	6
1.3. Kocaeli Güneş Enerji Potansiyeli.....	8
1.4. Güneş Enerjisinin Dönüşümü.....	10
1.5. Güneş Kollektörleri.....	12
1.5.1. Odaklanabilen güneş kollektörleri.....	14
1.5.2. Sabit güneş kollektörleri.....	14
1.5.2.1. Sıvı akışkanlı güneş kollektörleri	15
1.5.2.2. Hava akışkanlı güneş kollektörleri.....	15
2. ENERJİ DEPOLAMA.....	17
2.1. Mekanik Enerji Depolama.....	17
2.2. Elektrik Enerjisi Depolama.....	18
2.3. Kimyasal Enerji Depolama.....	18
2.4. Isıl Enerji Depolama.....	18
2.4.1. Duyulur ısı depolama.....	22
2.4.1.1. Katı maddelerde duyulur ısı depolama.....	23
2.4.1.2. Sıvı maddelerde duyulur ısı depolama.....	25
2.4.1.3. Katı ve sıvı maddeleri kullanarak ısı depolama.....	27
2.4.2. Gizli ısı depolama.....	28
2.4.2.1. Faz değiştiren maddeler (FDM).....	30
3. LİTERATÜR TARAMASI.....	34
3.1. Güneş Enerjisinden Termal Enerji Olarak Yararlanılmasının Tarihçesi.....	34
3.2. Yapılan Uluslararası Çalışmalar	37
3.3. Ülkemizde Yapılan Çalışmalar	43
4. ISI DEPOSUNUN TASARIMI VE DENEYSEL ÇALIŞMA YÖNTEMİ.....	51
4.1. Deney Düzenegi.....	51
4.1.1. Isı deposunun tasarım ve imalatı.....	52
4.1.2. Su akışkanlı düzlemsel güneş kollektörleri	55
4.1.3. Hava akışkanlı düzlemsel güneş kollektörü.....	56
4.1.4. Havalandırma ve su tesisatı.....	57
4.2. Isı Depolamada Kullanılan Malzemeler.....	60
4.2.1. Bazalt taşı.....	60
4.2.2. Su ve parafin wax.....	61

4.3. Kullanılan Cihazlar, Aletler.....	62
4.3.1. Piranometre ve veri kaydedicisi (datalogger).....	62
4.3.2. Sıcaklık ve nem veri toplayıcısı.....	63
4.3.3. Dört kanallı sıcaklık veri toplayıcı.....	63
4.3.4. Teleskobik problu kızgın tel hava hızı ve sıcaklık ölçer.....	63
4.3.5. Termal kamera.....	63
4.3.6. Yağlı-dilimli radyatör.....	63
4.3.7. Oda termostatu.....	63
4.3.8. Zaman ayarlı priz.....	64
4.3.9. Enerji ve akım kaydedici.....	64
4.4. Yapılan Diğer Çalışmalar.....	64
4.4.1. Isı deposunda faz değiştiren madde kullanılmasının etkisinin araştırıldığı deney.....	64
4.4.2. Isı deposuna direkt güneş ışınımı etkisinin incelendiği deney.....	65
5. SİSTEMİN MATEMATİKSEL İFADESİ VE CFD İLE MODELLENMESİ.....	66
5.1. Taşlarda Akış.....	66
5.1.1 Darcy yasası.....	67
5.1.2 Ergün denklemi.....	68
5.1.3 Forchheimer – Darcy denklemi.....	69
5.1.4 Brinkman denklemi.....	69
5.2. Taşlarda Isı Depolamanın Matematiksel İfadesi.....	70
5.3. Suda Isı Depolamanın Matematiksel İfadesi.....	72
5.4. Faz Değiştiren Maddelerde Isı Depolamanın Matematiksel İfadesi.....	72
5.5. Hava ve Su Akışkanlı Güneş Kollektöründe Elde Edilen Isının Matematiksel İfadesi.....	73
5.6. Isı Deposunda Depolanan Toplam Isının Matematiksel İfadesi.....	73
5.7. Isı Deposuna Aktarılan Isı Güçler ve Direkt Güneş Işınımı Etkisi.....	75
5.8. Sistemin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD/CFD) ile Modellenmesi ve Analizi.....	77
5.8.1. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği.....	77
5.8.2. Temel denklemler.....	78
5.8.2.1. Kütle korunumu denklemi.....	78
5.8.2.2. Momentumun korunumu denklemi.....	79
5.8.2.3. Enerjinin korunumu denklemi.....	79
5.8.3. Üç boyutlu geometrik modelin oluşturulması.....	79
5.8.4. Ağ yapısının oluşturulması.....	84
5.8.5. Sınır şartları.....	88
6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	89
6.1. Hava Akışkanlı Güneş Kollektörüyle İlgili Yapılan Çalışmalar.....	89
6.2. Su Akışkanlı Güneş Kollektörüyle İlgili Yapılan Çalışmalar.....	92
6.3. Isı Deposuyla İlgili Yapılan Çalışmalar.....	93
6.4. Taşların Ortalama Sıcaklığının Denklemi ve Bulanık Mantıkla Modellenmesi.....	106
6.5. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) ile Elde Edilen Bulgular.....	110
6.5.1. Akım çizgileri ve sıcaklık dağılımları.....	111
6.5.2. Hız vektörleri.....	112
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	114

7.1. Sonuçlar.....	114
7.2. neriler.....	117
KAYNAKLAR.....	119
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	125
ÖZGEÇMİŞ.....	126



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Güneşte enerjinin oluşumu.....	4
Şekil 1.2.	Doğrudan ışınım ve yaygın ışınım.....	5
Şekil 1.3.	Türkiye güneş enerjisi potansiyeli atlası.....	6
Şekil 1.4.	Türkiye global ışınım değerleri.....	7
Şekil 1.5.	Türkiye ortalama güneşlenme süreleri.....	7
Şekil 1.6.	Kocaeli güneş enerjisi potansiyeli atlası.....	8
Şekil 1.7.	Kocaeli global ışınım değerleri.....	9
Şekil 1.8.	Kocaeli ortalama güneşlenme süreleri.....	9
Şekil 1.9.	Güneş enerjisinden faydalanma yolları.....	10
Şekil 1.10.	Basit bir pasif sistem.....	11
Şekil 1.11.	Güneş kolektörlerinin sınıflandırılması.....	13
Şekil 1.12.	Düzlemsel güneş toplayıcısının kesit ve açılmış görünüşü.....	15
Şekil 1.13.	Hava akışkanlı güneş kolektörünün şematik görünüşü.....	16
Şekil 2.1.	Maddenin faz değişimi esnasındaki enerji depolama, sıcaklık grafiği.....	20
Şekil 2.2.	Isı depolama yöntemleri.....	21
Şekil 2.3.	Harry Thomasson yöntemi ile enerji depolama.....	28
Şekil 2.4.	Faz değiştiren malzemelerin sınıflandırılması.....	30
Şekil 3.1.	Pasif metot kullanılmış ev.....	34
Şekil 3.2.	Solar I adı verilen ve Amerika’da yapılmış güneşle, ısıtılan ilk ev olarak kabul edilen yapı.....	35
Şekil 3.3.	Türkiye’de ilk yapılan güneş evi olan ODTÜ güneş evi.....	36
Şekil 3.4.	Diyarbakır güneş evi.....	36
Şekil 3.5.	Bulut ve Durmaz tarafından önerilen dış hava karışıklı HAGK’lü ısıtma sistemi.....	44
Şekil 3.6.	Koray Arda’nın çalıştığı sistemin şematik görünümü.....	45
Şekil 3.7.	Hüseyin Benli’nin sera ve ısıtma sistemini oluşturan ekipmanlarının görünümü.....	46
Şekil 3.8.	Ayşe İsmet Çalış’ın sistem şeması ve ısı deposunun görüntüsü.....	47
Şekil 3.9.	Mert Gürtürk’ün deney düzeneğinin görüntüsü.....	48
Şekil 3.10.	Okan Aslan’ın vakum emdirme düzeneğinin görünümü.....	48
Şekil 3.11.	Hakan Esgel’in çalışmış olduğu kordiyerit malzemeden altıgen şekilli tuğla.....	49
Şekil 3.12.	Hacer Akhan’ın deney sisteminin şematik görünüşü.....	50
Şekil 4.1.	Deney sistemi ana elemanları şematik görünüm.....	52
Şekil 4.2.	Deney sistemi ana elemanları.....	52
Şekil 4.3.	Isı deposu.....	53
Şekil 4.4.	Isı deposu ve konteynerdeki akışkan hareketleri.....	54
Şekil 4.5.	Isı deposu içerisinde bulunan tank, önden görünüş, taşlarla dolu ve boş hali.....	54
Şekil 4.6.	Isı deposu içerisinde bulunan tank, üstten görünüş.....	55
Şekil 4.7.	Su akışkanlı güneş kolektörü.....	56

Şekil 4.8.	Hava akışkanlı güneş kollektörü.....	57
Şekil 4.9.	Güneşle ısıtılan havanın sistemdeki dolaşımı.....	58
Şekil 4.10.	Hava akışını açıp/kapatan check valfler.....	58
Şekil 4.11.	Havalandırma tesisatında kullanılan kanal tipi fan.....	59
Şekil 4.12.	Fanın debi- statik basınç grafiği.....	60
Şekil 4.13.	Bazalt taşı çıkarılan işletmeden bir görüntü.....	61
Şekil 4.14.	Isı deposunun termal kamera ile çekim yapılan yüzeyi.....	65
Şekil 5.1.	Isı deposunun şematik görünümü.....	74
Şekil 5.2.	Isı deposuna transfer edilen ısıl güçler.....	76
Şekil 5.3.	Isı deposunun geometrik olarak oluşturulan katı modeli; ana hatlar.....	80
Şekil 5.4.	Isı deposunun geometrik olarak oluşturulan katı modeli; dıştan görünüş.....	80
Şekil 5.5.	Isı deposunun geometrik olarak oluşturulan katı modeli; şeffaf görünüş.....	81
Şekil 5.6.	Isı deposu içerine konulmuş olan bazalt taşlarının modeli.....	81
Şekil 5.7.	Isı deposu içerine konulmuş olan bazalt taşlarının modeli.....	82
Şekil 5.8.	Isı deposu içerine fan yardımıyla gönderilen havanın modellenmesi.....	82
Şekil 5.9.	Isı deposu içerine fan yardımıyla gönderilen havanın modellenmesi.....	83
Şekil 5.10.	Sıcak havayı ısı deposuna taşıyan boruların görünümü.....	83
Şekil 5.11.	Sıcak havayı ısı deposuna taşıyan boruların ısı deposu içerisindeki görünümü.....	84
Şekil 5.12.	Isı deposu oluşturulan ağ yapısı.....	85
Şekil 5.13.	Orta kesitte oluşturulan ağ yapısı-1.....	85
Şekil 5.14.	Orta kesitte oluşturulan ağ yapısı-2.....	86
Şekil 5.15.	Orta kesit girişte oluşturulan ağ yapısı.....	86
Şekil 5.16.	Hava giriş yerinde oluşturulan ağ yapısı.....	87
Şekil 5.17.	Hava çıkış yerinde oluşturulan ağ yapısı.....	87
Şekil 6.1.	HAGK 5 m/s hava hızında (0,068 kg/s kütleli debide) sıcaklık değerleri.....	89
Şekil 6.2.	HAGK 2 m/s hava hızında (0,027 kg/s kütleli debide) sıcaklık değerleri.....	90
Şekil 6.3.	HAGK'ye 5, 4, 3 ve 2 m/s hızlarında (0,068, 0,055, 0,041, 0,027 kg/s kütleli debide) gönderilen havanın kollektörden çıkış sıcaklığı ve güneş ışınımı değerleri.....	91
Şekil 6.4.	Su akışkanlı güneş kollektörü sıcaklık değerleri.....	92
Şekil 6.5.	Isı deposu içerisi boşken güney cepheden güneş etkisiyle ısı deposunun ısınması, ısı deposu ve dış ortam sıcaklık değerleri.....	93
Şekil 6.6.	Tank içindeki suda ısı depolayan (içerisine bazalt taşları yerleştirilmeyen) ısı deposu ile mekân ısıtılmasına ait sıcaklık değerleri.....	94
Şekil 6.7.	İçerisine bazalt taşları yerleştirildikten sonra (tank içerisinde hem suda hem de bazalt taşında ısı depolayan) ısı deposu ile mekân ısıtılmasına ait sıcaklık değerleri.....	95

Şekil 6.8.	Bazalt taşları ile birlikte tank içerisindeki bölmeye parafin wax da yerleştirildikten sonra (tank içerisinde suda ve parafin waxta, kabin içerisinde bazalt taşında ısı depolayan) ısı deposu ile mekân ısıtmasına ait sıcaklık değerleri.....	96
Şekil 6.9.	Parafin wax kullanılmayan ve parafin wax kullanılan ısı deposundaki taşların ortalama sıcaklıkları.....	97
Şekil 6.10.	22 Nisan parafin wax kullanılmayan ve 30 Nisan'da parafin wax kullanılan sistemler için dış ortam sıcaklık değerleri ile ısı deposundan mekâna gönderilen sıcaklık değerleri.....	98
Şekil 6.11.	Isı deposu kullanılan ve ısı deposu kullanılmayan mekânların harcadığı elektrik enerjisi değerleri (Isı deposunda parafin wax kullanılmamıştır).....	99
Şekil 6.12.	Isı deposu kullanılan ve ısı deposu kullanılmayan mekânların harcadığı elektrik enerjisi değerleri (Isı deposunda parafin wax kullanılmıştır).....	100
Şekil 6.13.	Isı deposu kullanılan mekânda ısıtıcının çektiği elektrik gücü (Isı deposunda parafin wax kullanılmamıştır)	101
Şekil 6.14.	Isı deposu kullanılmayan mekânda ısıtıcının çektiği elektrik gücü.....	101
Şekil 6.15.	Isı deposu kullanılan mekânda ısıtıcının çektiği elektrik gücü (Isı deposunda parafin wax kullanılmıştır)	102
Şekil 6.16.	Isı deposu kullanılmayan mekânda ısıtıcının çektiği elektrik gücü.....	102
Şekil 6.17.	Ölçülen güneş ışınımı değerleri.....	103
Şekil 6.18.	Güneş ışığını direkt olarak alan ve almayan ısı deposundaki taşların ortalama sıcaklık değerleri.....	104
Şekil 6.19.	Güneş ışınımının taşlara direkt temasının olmadığı gün sonunda (güneşlenme sırasında cam yüzey kapatılmıştır) saat 20:00 itibariyle termal kamera ile ölçülen sıcaklık değerleri.....	104
Şekil 6.20.	Güneş ışınımının taşlara direkt temasının olduğu gün sonunda saat 20:00 itibariyle termal kamera ile ölçülen sıcaklık değerleri.....	105
Şekil 6.21.	Güneş ışınımının taşlara direkt temasının olduğu gün saat 14:00 itibariyle termal kamera ile ölçülen sıcaklık değerleri.....	105
Şekil 6.22.	Zamana bağlı güneş ışınımı ve taşların ortalama sıcaklığı (5 Nisan 2016)	106
Şekil 6.23.	Zamana bağlı güneş ışınımı ve taşların ortalama sıcaklığı (7 Nisan 2016)	106
Şekil 6.24.	Zamana bağlı güneş ışınımı ve taşların ortalama sıcaklığı (16 Nisan 2016)	107
Şekil 6.25.	Güneş ışınımına bağlı olarak taşların ortalama sıcaklığının karşılaştırması.....	107
Şekil 6.26.	Fuzzy Logic uygulamasında girdiler ve çıktı.....	108
Şekil 6.27.	Fuzzy Logic uygulamasında tanımlanan üyelik fonksiyonları.....	109
Şekil 6.28.	Güneş ışınımına ve dış sıcaklığa bağlı olarak taşların ortalama sıcaklığının karşılaştırması.....	110
Şekil 6.29.	Sıcaklık dağılımlarının görüldüğü akım çizgileri.....	111
Şekil 6.30.	Isı deposu içerisinde görülen sıcaklık dağılımları.....	112
Şekil 6.31.	Isı deposu hız vektörleri dağılımı.....	113
Şekil 6.32.	Isı deposu çıkış hızı.....	113

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1.	Bazı depolama malzemelerinin 300 K sıcaklığındaki özellikleri.....	23
Tablo 2.2.	Bazı sıvı maddelerin termofiziksel özellikleri.....	26
Tablo 2.3.	Bazı parafinlerin özellikleri.....	32
Tablo 4.1.	Su akışkanlı güneş kolektörünün özellikleri..	55
Tablo 4.2.	Hava akışkanlı güneş kolektörünün özellikleri.....	56
Tablo 4.3.	Tesisatta kullanılan fana ait özellikler.....	59
Tablo 4.4.	Çalışmamızda kullanılan bazalt taşının analiz sonuçları.....	62



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Amper
a	: Anlık
A, B	: Deneysel sabitler
A _c	: Kollektör alanı
A _Y	: Güneş ışınımı gelen bazalt taşı alanı
Al ₂ O ₃	: Alüminyum oksit
b	: Forchheimer sabiti
c	: Işık hızı
C	: Karbon
C	: Sürüklenme katsayısı
°C	: Santigrad derece
CaCl ₂ .6H ₂ O	: Kalsiyum klorür hekza hidrat
CaO	: Kalsiyum oksit
Cd	: Kadmiyum
CH ₄	: Metan
C ₅ H ₁₀	: Pentan
C _k	: Katı halde sabit basınçta özgül ısı
C _p	: Sabit basınçta özgül ısı
C _s	: Sıvı halde sabit basınçta özgül ısı
d	: Depo
d _p	: Küreciklerin çapı
dB(A)	: Desibel
d/d	: Devir / dakika
f	: Sıvı
f _{i(gerçek)}	: Taşların ortalama ölçüm sıcaklığı
f _{i(model)}	: Tahmin edilen ortalama taş sıcaklığı
f _{i(ortalama)}	: Taşların ortalama ölçüm sıcaklık değerlerinin aritmetik ortalamasını
E	: Enerji
Fe ₂ O ₃	: Demir(III) oksit
F _R	: Isı verimi katsayısı
G	: Akışkan kütle akısı
H	: Hidrojen
He	: Helyum
h _{KS}	: Erime gizli ısısı
h _v	: Yatakla akışkan arasındaki hacimsel ısı transfer katsayısı
I _T	: Işınım miktarı
I	: Işınım miktarı
k	: Isı iletim katsayısı
K.	: Kelvin
K	: Gözenekli ortam geçirgenliği
K ₂ O	: Potasyum oksit
m	: Kütle
MgO	: Magnezyum oksit

MnO	: Mangan oksit
m_s	: Su kütlesi
\dot{m}	: Kütlesel debi
μ_e	: Etkin viskozite
μ_f	: Akışkan dinamik viskozitesi
μm	: Mikrometre
n	: Nötron
n	: Tahmin edilen veri sayısı
Na ₂ O	: Sodyum Oksit
Ni	: Nikel
Pa	: Paskal
P ₂ O ₅	: Fosfor pentaoksit
Q	: Isıl enerji
Q _a	: Taş yatağındaki kullanılabilir enerji
Q _B	: Bazalt taşlarında depolanan ısı miktarı
Q _ç	: Isı deposundan çıkan ısı
Q _D	: Duyulur ısı enerji
Q _G	: Gizli ısı enerji
Q _g	: Kollektörden gelen ısı
Q _{Isı Deposu}	: Isı deposunun toplam enerji miktarı
Q _k	: Kayıp ısı miktarı
Q _M	: Katıdan sıvı hale geçen maddede depolanan ısı enerji
Q _P	: Parafin waxta depolanan ısı miktarı
Q _s	: Sistemde depolanan ısı enerji
Q _{Su}	: Suda depolanan ısı miktarı
Q _t	: Taş yatağında depolanan enerji
Q _U	: Anlık faydalı ısı enerji
Q _y	: İhtiyaç için çekilen ısı miktarı
\dot{Q}_1, \dot{Q}_2	: Kollektör yüzeylerine gelen ısı güç
\dot{Q}_3	: Isı deposu yüzeyine gelen ısı güç
\dot{Q}_{Top}	: Isı deposuna gelen toplam ısı güç
\dot{Q}_{IT}	: Isı deposuna verilen toplam ısı güç
\dot{Q}_S	: SAGK'nden aktarılan ısı güç
\dot{Q}_H	: HAGK'nden aktarılan ısı güç
\dot{Q}_R	: Bazalt taşlarından ışınlama ile aktarılan ısı güç
R ²	: Determinasyon katsayısı
SiO ₂	: Silisyum dioksit
S	: Katı
t	: Zaman
T	: Sıcaklık
ΔT	: Sıcaklık farkı
T _A	: Dış ortam (çevre) sıcaklığı
T _ç	: Kollektörden çıkan hava sıcaklığı
T _d	: Depo sıcaklığı
T _d ⁺	: Belirli bir zaman sonraki depo sıcaklığı
T _e	: Erime sıcaklığı
T _G	: Kollektöre giren hava sıcaklığı

T_i	: Kollektör levha sıcaklığı
T_s	: Yüzey sıcaklığı
TiO_2	: Titanyum dioksit
T_1	: Birinci durumdaki sıcaklık
T_2	: İkinci durumdaki sıcaklık
U	: Isı geçirgenlik katsayısı
U_L	: Kollektör ısı geçiş katsayısı
u	: X yönünde hız bileşeni
v	: Y yönünde hız bileşeni
v	: Darcy hızı
V	: Hacim
\vec{v}	: Hız vektörü
W	: Z yönünde hız bileşeni
Y	: Isı deposundaki taşların ortalama sıcaklığı
τ	: Işınım geçirme oranı
α	: Işınım yutma oranı, ısı yayılım katsayısı
σ	: Stefan-Boltzmann sabitini
λ	: Faz değiştirme ısı
ρ	: Yoğunluk
ρ_s	: Su yoğunluğu
α	: Isı yayılım katsayısı
ε	: Yüzeyin yayıcılık katsayısı
ε	: Gözeneklilik oranı
θ	: Boyutsuz zaman
∇p_f	: Akışkan içindeki basınç değişim vektörü

Kısaltmalar

AB	: Avrupa Birliği
CFD	: Computational Fluid Dynamics (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği)
CAD	: Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Dizayn)
DMİ	: Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü
EİE	: Elektrik İşleri Etüt İdaresi
FDM	: Faz Değiştiren Madde
GEPA	: Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HAGK	: Hava Akışkanlı Güneş Kollektörü
KOH	: Karekök Ortalama Hata Değeri
MIT	: Massachusetts Institute of Technology
MRH	: Minimum Ortalama Rölatif/Bağıl Hata
ODTÜ	: Orta Doğu Teknik Üniversitesi
SAGK	: Su Akışkanlı Güneş Kollektörü
TEP	: Ton Eşdeğer Petrol
TTH	: Temsili Temel Hacim
XPS	: Ekstrude Polistren

GÜNEŞ ENERJİSİNİN MEKÂN ISITMASI AMACIYLA DUYULUR ISI DEPOLAMA MALZEMELERİNDE VE FAZ DEĞİŞTİREN MADDELERDE DEPOLANMASININ İNCELENMESİ

ÖZET

Güneş enerjisinin ısı enerji olarak depolandığı sistemlerde ısı depolama malzemesi olarak çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Genel olarak hava akışkanlı güneş kolektörlerinde ışınım enerjisi ısı enerjisine dönüştürülmekte ve dönüştürülen ısı, hava ile ısı deposuna transfer edilmektedir. Taşların havayla iyi temas edeceği düşünüldüğünde depolamanın verimli olacağı öngörülmektedir. Ancak bu şekilde kullanılan ısı depoları genelde tüm yüzeyleri kapalı olacak şekilde (güneş ışınımını direkt olarak alamayacak şekilde) tasarlanmakta, taşlar etrafında hava dolaştırılmak suretiyle enerji aktarımı yapılmaktadır. Bu çalışmada bazalt taşları, su ve faz değiştiren madde olan parafin wax kullanılarak, güneş enerjisini termal enerji olarak depolayan bir ısı deposu tasarlanmıştır. Isı deposunda klasik tasarımlardan farklı olarak güneş cepheden güneş ışığını direkt alacak şekilde cam örtü kullanılmıştır. Böylece güneş ışınımının direkt taşlara temasının ısı deposunun performansına etkisi incelenmiştir. Tasarlanan ısı deposunda güneşin taşlara direkt temas etmediği durumda taşların sıcaklığı maksimum 46,6 °C olabilirken, güneş direkt taşlara temas ettiği durumda 56,8 °C maksimum sıcaklık elde edilebilmektedir. Isı deposunda böylelikle %11,7 daha fazla enerji depolanabilmektedir. Yine klasik ısı deposu tasarımlarından farklı olarak faz değiştiren madde ve suyun yüksek ısı tutma avantajı ile taşların yüksek ısı transfer hızı (temas yüzeyinin fazla olması sayesinde) avantajı birleştirilip ısı deposunun performansı araştırılmıştır. Faz değiştiren madde ile desteklenen ısı deposundan daha uzun süre faydalanmanın mümkün olduğu ve %9,9 daha fazla enerji depolanabildiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Faz Değiştiren Madde, Güneş Enerjisi Depolama, Isıl Enerji Depolama, Taşlarda Enerji Depolama, Termal Enerji.

INVESTIGATION OF STORAGE OF SOLAR ENERGY IN SENSIBLE HEAT STORAGE MATERIALS AND PHASE CHANGE MATERIALS FOR THE AIM OF SPACE HEATING

SUMMARY

Various materials are used as heat storage material in the systems where solar energy is stored as thermal energy. Generally, in air-fluid solar collectors, radiation energy is converted into heat energy and the converted heat is transferred to the heat storage with air. Storing is predicted to be efficient when stones are thought to be in good contact with air. However, the heat stores used in this way are generally designed as all the surfaces closed (in such a way that they can not directly receive the sunlight), and air is circulated around the stones to transfer energy. In this study, a heat storage system that stores solar energy as thermal energy was designed using basalt stones, water and a phase change material, paraffin wax. Unlike the classic designs in the heat storage system a glass cover was used to take the sunlight directly from the south facade. Thus, the effect of solar radiation which contacts with stones directly on the performance of heat storage system has been investigated. In the designed heat storage system, the temperature of the stones can be maximum 46.6 °C when the sun does not directly contact with the stones, and can be obtained maximum 56.8 °C when the sun reaches the stones directly. Thus, 11.7% more energy can be stored in the heat storage system. Unlike conventional heat storage designs, the performance of the heat storage has been investigated combining the high temperature holding advantage of phase change material and water and the high heat transfer rate advantage of the stones (thanks to the excess of contact surface). It has been determined that it is possible to benefit from the heat storage system supported with phase change material for a longer period and the energy can be stored up to 9.9% more.

Keywords: Phase Change Material, Solar Energy Storage, Thermal Energy Storage, Energy Storage in Stones, Thermal Energy.

GİRİŞ

Enerji, ülkelerin ekonomik ve sosyal gelişiminde ve buna bağlı olarak da milletlerin refahının artmasında çok önemli bir role sahiptir. Bir devletin büyük devletler arasında olabilmesi ve dünya muvazenesinde yerini alabilmesinin yolu günümüz şartlarında enerji yönetiminden ve enerjiye hâkimiyetten geçmektedir. Enerjinin günümüzde böylesine stratejik bir öneme sahip olduğu gerçeğinden hareketle, ülkemizin enerji potansiyelinin tespit ederek yerli kaynaklara yönelmek ve en optimal tercihlerle öncelikli olarak dışa bağımlılığı azaltmak gerekmektedir.

Güneş, yaşam için gerekli olan enerjiyi dünyaya sağlayan hem dünyayı ısıtan hem de adeta bir lamba gibi aydınlatan yegâne yıldızdır. Rüzgârın oluşumunda, denizlerdeki dalgaların oluşumunda, fosil yakıtların oluşumunda, biyokütle oluşumunda, su döngüsünü sağlayarak akarsu hareketlerinin oluşumunda hep güneş enerjisinin etkisi ve biçim değiştirmesi görülmektedir [1]. Güneş enerjisi doğal enerji kaynaklarının pek çoğunun kökenini oluşturmakta olup, ısıtma ve elektrik üretme gibi maksatlarla doğrudan güneş enerjisinden yararlanılmaktadır [1].

Ülkemiz, coğrafi konumundan dolayı yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahip ülkeler sınıfındadır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığınca hazırlanan, Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasında (GEPA) yer alan bilgilere göre, ülkemizin yıllık toplam güneşlenme süresi 2.737 saat (günlük toplam 7,5 saat), yıllık toplam gelen güneş enerjisi ise 1.527 kWh/m².yıl'dır (günlük toplam 4,2 kWh/m²) [2].

Ülkemize oranla çok daha az güneş enerjisi potansiyeline sahip ülkelerin enerjiye yapmış oldukları yatırımlar dikkat çekicidir. Örneğin, Almanya, 2017 yılı itibariyle sahip olduğu 42.000 MW güneş enerjisi (fotovoltaik) kurulu gücü ile dünyanın en büyük fotovoltaikten elektrik üreten ülkelerindendir.

Mevcut potansiyele rağmen Türkiye'de güneş enerjisi kullanımı istenilen düzeyde değildir. Türkiye Elektrik İletim A.Ş verilerine göre Türkiye elektrik enerjisi kurulu gücü 2017 yılı Nisan ayı sonu itibariyle 85.200 MW' tır. Toplam güç içerisinde

güneş enerjisinin payı 3.420,7 MW' tır [3]. Bununla birlikte ülkemiz kullanım suyunun ısıtılması amacıyla güneş enerjisini kullanan ülkeler arasında en önlere bulunmaktadır [4]. Güneş enerjisinden sadece sıcak kullanma suyu temininde yararlanılmakta olup konut ısıtmasında güneş enerjisi neredeyse hiç kullanılmamaktadır.

Türkiye, güneş enerjisi açısından diğler ülkelere oranla çok daha avantajlı bir konumdadır. Bu sebeple sahip olunan güneş enerjisi potansiyelinin etkin biçimde kullanılması gerekmektedir. Güneş enerjisindeki gelişmeler yakından takip edilmeli ve hayatın her alanında güneş enerjisinden faydalanmalıdır. Böylece, ülke ekonomisinde önemli gider olan enerji harcamaları da kalkınmaya yönelik farklı faaliyetlere aktarılabilir [5].

Günümüzde çevre sorunları ve buna bağılı olarak çevre bilinci ve hassasiyeti artmaktadır. Enerjinin önemli bir kısmının konutlarda ve ısınma olarak kullanıldığı dikkate alındığında güneşten maksimum fayda sağılayan bina tasarımları yapmanın ve bu önlemlerle binaların enerji tüketimlerini azaltmanın zaruri olduğı görülecektir. Güneş enerjisi potansiyeli yüksek olan ülkemizde güneş enerjisi kullanımının artırılması gerekmektedir. Böylelikle hem enerji temininde önemli ölçüde dışa bağımlı olan ülkemizin bu bağımlılıktan kurtulması sağılanmış olacak hem de çevre dostu enerjiye dönüşüm sağılanmış olacaktır.

Güneş enerjisinin konut ısıtmasında kullanılması, alternatif enerji uygulamaları alanında önemli bir araştırma konusu olmuştur. Bu alandaki çalışmalar artarak devam etmektedir. Güneş enerjisi ısıtma sistemlerinde duyulur veya gizli ısı olmak üzere iki şekilde depolanmaktadır. Depolanan bu ısı enerjisinden hem güneşin bulunduğı gün içerisinde hem de güneşin olmadığı akşam/gece saatlerinde ortam ısıtılmasında kullanılabilir. Güneşin uzun süre ve yapılan yatırımı karşılayacak nitelikte depo edilebilmesi, ısıtmada kullanılan enerji miktarının azaltılması noktasında büyük önem arz etmektedir. Tüm dünyada harcanan enerjinin büyük bir kısmının konut ısıtmasında kullanıldığı düşünülduğünde bu alanda sağılanacak gelişmelerin ne denli önemli olduğı daha iyi anlaşılacaktır.

Bu çalışma ile kesikli bir enerji olan güneş enerjisinden ısının depolanması ve bu ısının daha uzun süre kullanılabilmesi amaçlanmıştır. Yapılan çalışmada depolama

malzemesi olarak taş, su ve faz değiştiren madde kullanılmıştır. Taş olarak Kocaeli yakın çevresinden çıkarılmakta olan bazalt taşı kullanılmıştır.

Literatürden elde edilen bilgelere göre;

1. Su iyi ısı depolayan, kolay temin edilen, zararsız bir akışkandır.
2. Faz değiştiren maddeler gizli ısıyı da ısı depolamada kullandığından az küttele çok miktarda ısı depolayabilmektedir.
3. Kayaçlar/taşlar ise geniş yüzeyleri sayesinde hava akışkanı ile iyi ısı transferi sağlayabilmektedir.

Bunlara ek olarak taşlar hem kollektörle ısıtılan havadan ısı alacak hem de cam yüzey sayesinde direkt güneş işığından enerji sağlayabilecektir.

Genel olarak klasik ısı deposu tasarımlarında, taşların yüzey alanlarının fazla olması nedeniyle hava ile iyi temas edeceği düşünölmekte ve güneşi direkt almayan, kapalı ısı depoları kullanılmaktadır. Hava akışkanlı güneş kollektöründe ısıtılan hava, bu depolar içerisindeki taşlar arasında dolaştırılarak ısı enerjisi depolanmaktadır. Ayrıca klasik ısı depolarında sadece tek akışkan (su ya da hava) kullanılarak ısı deposuna enerjisi aktarılmaktadır. Çalışmamızda tasarladığımız yeni ısı deposu ise hem ısınmış havanın taşlar arasında dolaşmasına imkân verecek hem de güney cepheden direkt güneş işınımı alacak şekilde imal edilmiştir. Bununla birlikte hem hava akışkanı hem de su akışkan olarak kullanılmış ve kollektörlerde ısıtılan hava ve sudan ısı deposuna ısı enerjisi aktarılmıştır. Tasarım ve imalatı yapılan ısı deposu SOLİDWORKS programı ile modellenerek Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) programı olan Star CCM+ ile sayısal analiz yapılmıştır.

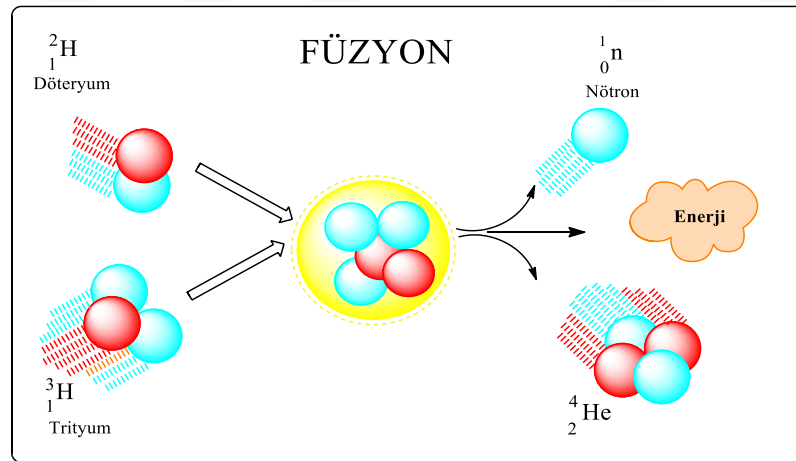
Bu özgün tasarımla mevcut ısı depolama sistemlerinin iyileştirilmesi hedeflenmekte ve buna bağlı olarak ölkemizin güneşten daha çok istifade etmesine katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

1. GÜNEŞ ENERJİSİ

Güneş, dünyadaki bütün canlılar için en önemli enerji kaynağıdır. Güneşin kendi yapısında bulunan hidrojen, helyuma füzyon reaksiyonu ile dönüşür ve enerji açığa çıkar (Şekil 1.1). Güneşin kütlesi Einstein'ın görelilik enerji teoremi olan;

$$E=m.c^2 \quad (1.1)$$

formülünde ifade edildiği şekliyle enerjiye dönüşmektedir. Denklemden (E) enerjiyi, (m) kütleyi (c) ise ışık hızını ifade etmektedir. Bu enerji herhangi bir harcama yapmadan elde edilen ve dünyanın tüketim ihtiyacı olan enerji miktarından kat kat fazla olan çevre dostu bir enerjidir. Güneş enerjisi teknolojileri, yöntem, malzeme ve teknolojik farklılık yönünden çeşitlilik göstermekle birlikte ısıtma amaçlı ve elektrik üretmek amaçlı olarak iki ana grup altında birleştirilebilir. Güneş enerjisiyle ilgili temel genel bilgiler bu bölümde verilmektedir.



Şekil 1.1. Güneşte enerjinin oluşumu

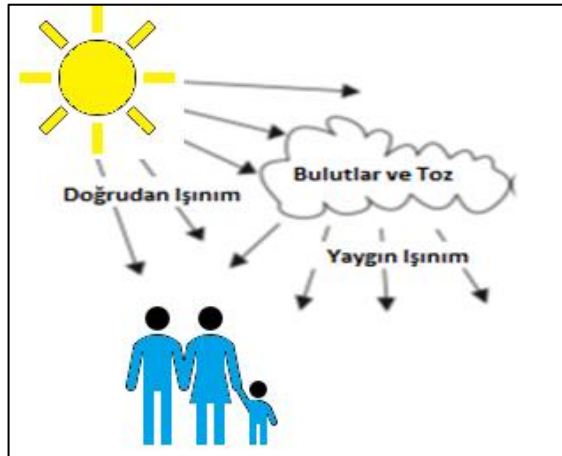
1.1. Güneşin Yapısı ve Gün Işığı

Güneş sisteminin en büyük yıldızıdır. Dünyaya uzaklığı 150 milyon kilometredir. Çapı Dünyanın çapının 109 katıdır. Kütlesi ise Dünya kütlesinin 333.000 katıdır. Güneşin yüzey sıcaklığı yaklaşık olarak 5.500-6.000 °C ve çekirdeğinin sıcaklığıysa yaklaşık 15 milyon °C'dir. Güneşten yayılan enerjinin yaklaşık iki milyonda birinin

yeryüzüne ulaştığı tahmin edilmektedir. Güneş ışınları 8,44 dakikada yeryüzüne ulaşır ve Güneş Dünyaya en yakın yıldızdır.

Güneş kütlelerinin yaklaşık olarak dörtte üçünün hidrojenden ve dörtte birinin helyumdan oluştuğu ifade edilmektedir. Hacim olarak dikkate alındığında ise Güneşin yaklaşık %92'si hidrojenden ve %8'i ise helyumdan oluşmaktadır. Bu oranlara göre çok küçük oranlarda ise diğer metaller Güneşin yapısı içerisinde yer almaktadır. Bahsedilen bu oranlar hidrojenin helyuma dönüşmesi nedeniyle, zamanla helyumun artması yönünde değişmektedir [6].

Güneş ışığı, değişik frekanstaki elektromanyetik dalgaların bileşiminden oluşmuştur. Güneş tarafından yayılan elektromanyetik spektrum; bir Angströmün kesirlerinden, yüzlerce metreye kadar değişir. Güneşin dünyaya ulaşan tayfları üç ana bölgeden oluşmuştur. Dalga boyu 0,4 μm ' den küçük olan ultraviyole (morötesi) ışınların payı %9' dur. Dalga boyu 0,4 μm ile 0,7 μm arasındaki görünür ışığın bulunma oranı %45'tir. Dalga boyu 0,7 μm ' den büyük olan kızıl ötesi (infrared)'in payı ise %46'dır ve Güneş'in ısıtma etkisi buradan kaynaklanmaktadır. Atmosfer dışında, birim yüzeye dik olarak, birim zamanda ulaşan güneş ışınımı, Güneş sabiti olarak tanımlanır ve değeri $1,353\text{kW}/\text{m}^2$ 'dir. Yeryüzüne ulaşan maksimum güneş ışınımı ise 0,3-2,5 μm dalga boyları arasında $1\text{ kW} / \text{m}^2$ kadardır. Yere, zamana ve iklime bağlı olarak Dünya'daki yaşam alanlarına gelen güneş enerjisi 3 ile $50\text{ MJ} / \text{m}^2$ gün arasında değişir [6]. Görüldüğü gibi belirli dalga boylarına sahip güneş ışınlarının atmosferde süzülerek yeryüzüne gelirler. Yeryüzüne ulaşan toplam güneş ışınımı, doğrudan ışınım ve yaygın ışınım oluşmaktadır (Şekil 1.2).



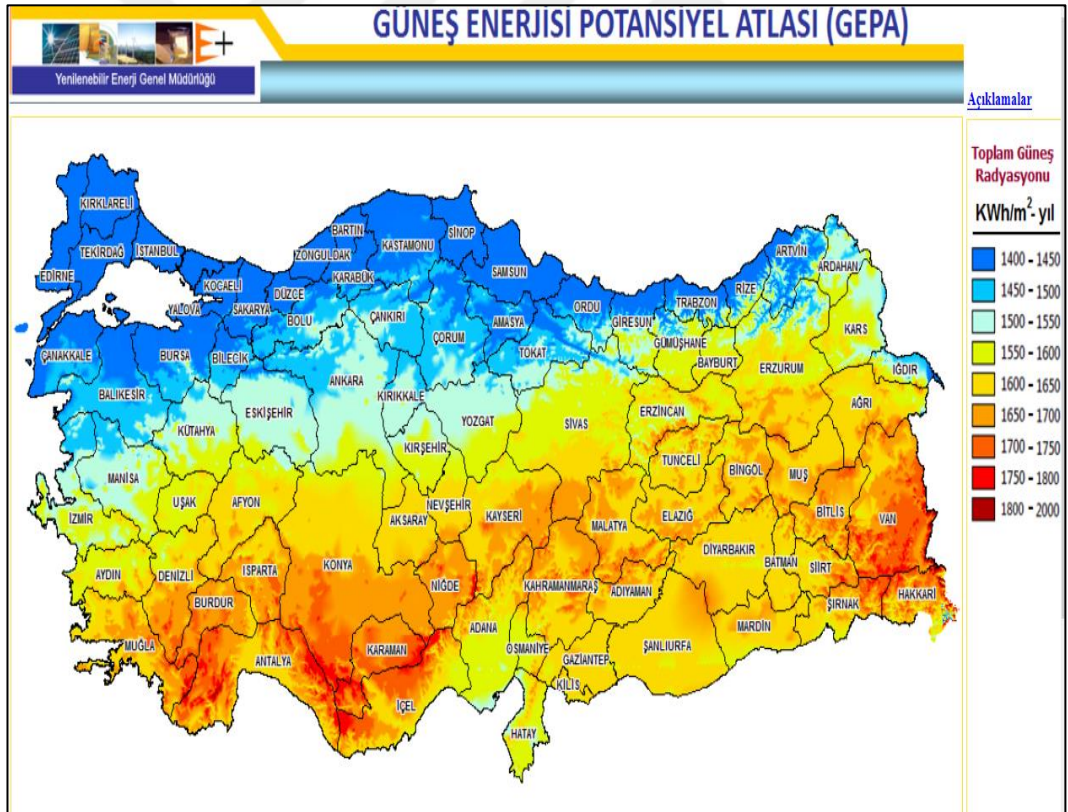
Şekil 1.2. Doğrudan ışınım ve yaygın ışınım

1.2. Türkiye'nin Güneş Enerji Potansiyeli

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığınca hazırlanan, Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına (GEPA) göre, toplam güneşlenme süresi yıllık 2.741 saat (günlük toplam 7,5 saat), toplam gelen güneş enerjisi yıllık 1.527 kWh/m².yıl (günlük toplam 4,18 kWh/m²) olduğu tespit edilmiştir [7].

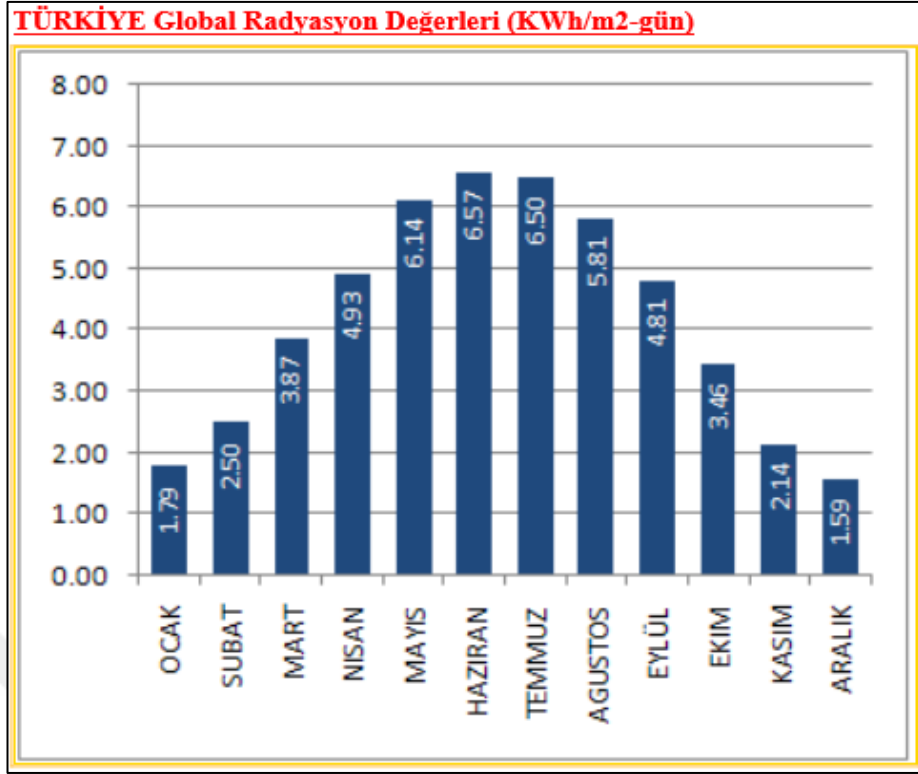
Türkiye'nin 2018 yılı itibari ile toplam kurulu olan güneş kolektör alanı yaklaşık olarak 20.200.000 m² olarak hesaplanmıştır. Güneş kolektörleri kullanılarak yaklaşık olarak 876.720 Ton Eşdeğer Petrol (TEP) ısı enerjisi üretilmiştir [7].

Şekil 1.3' te EİE ve DMİ istasyonlarından alınan ölçüm değerleriyle hesaplanan Türkiye'nin yıllık ortalama güneş ışınımı değerlerinin coğrafi bölgelere göre dağılımı görülmektedir [8].

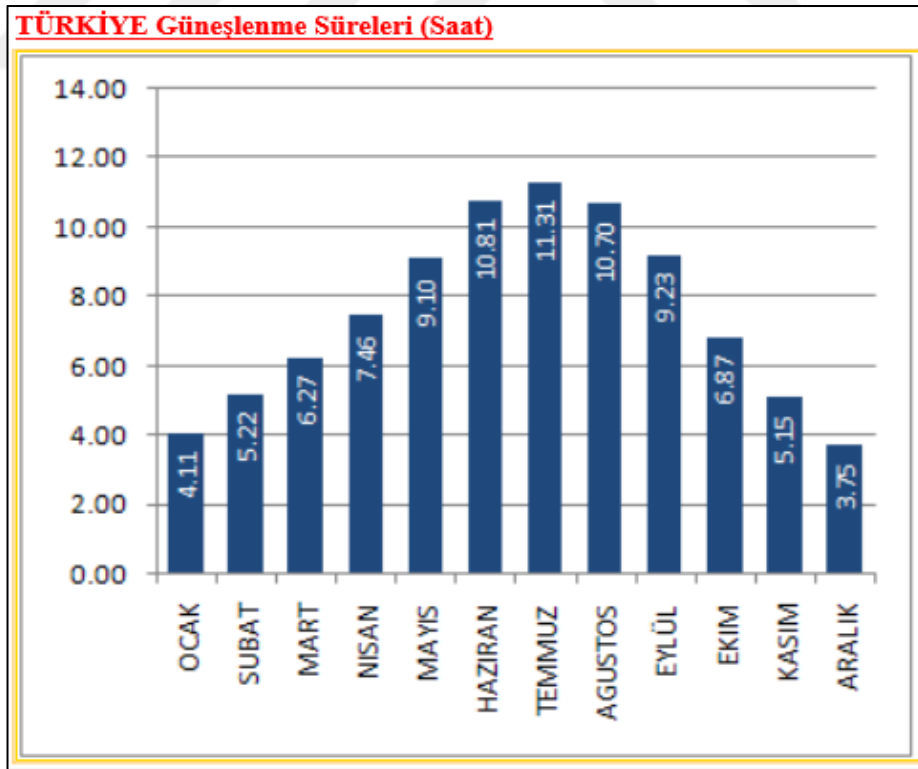


Şekil 1.3. Türkiye güneş enerjisi potansiyeli atlası [8]

Türkiye'nin ortalama günlük global güneş ışınım değerinin ve ortalama günlük güneşlenme sürelerinin aylara göre dağılımı sırasıyla Şekil 1.4 ve Şekil 1.5'te görülmektedir.



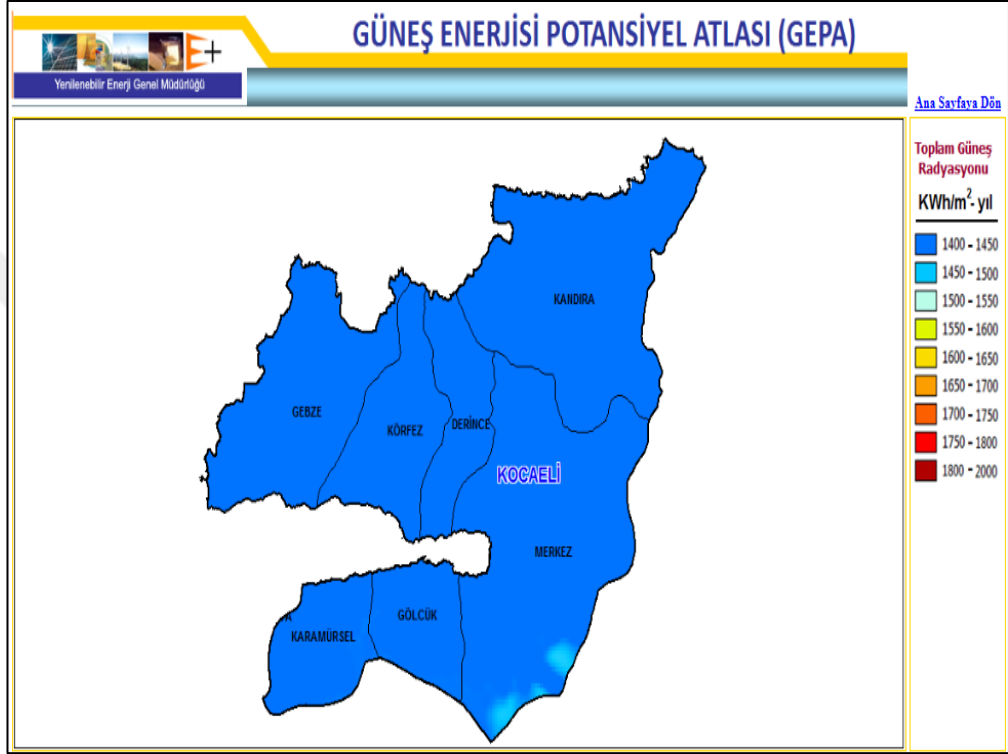
Şekil 1.4. Türkiye global ışınım değerleri [8]



Şekil 1.5. Türkiye ortalama güneşlenme süreleri [8]

1.3. Kocaeli Güneş Enerji Potansiyeli

Türkiye’de gerçekleşen ortalama $1.527 \text{ kWh/m}^2.\text{yıl}$ ’lık güneş enerjisi oldukça önemli bir potansiyel olup, Kocaeli İli Potansiyeli (Şekil 1.6) $1.400-1.450 \text{ kWh/m}^2.\text{yıl}$ ülke ortalamasının altında olsa da Avrupa ile karşılaştırıldığında güneşten istifade edilebilecek bir potansiyele sahip olduğumuz görülecektir.

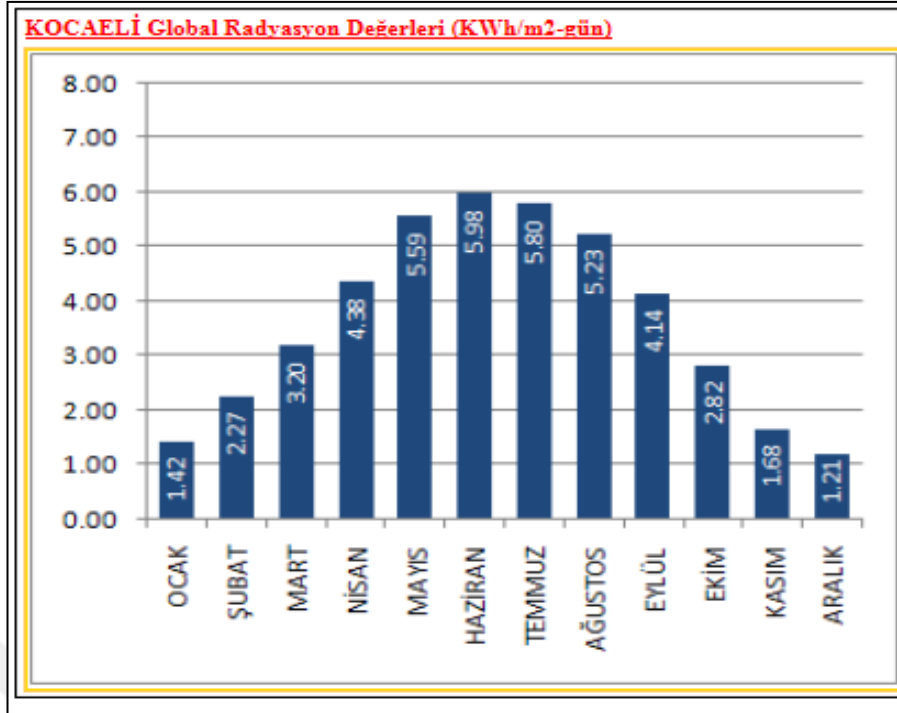


Şekil 1.6. Kocaeli güneş enerjisi potansiyeli atlası [8]

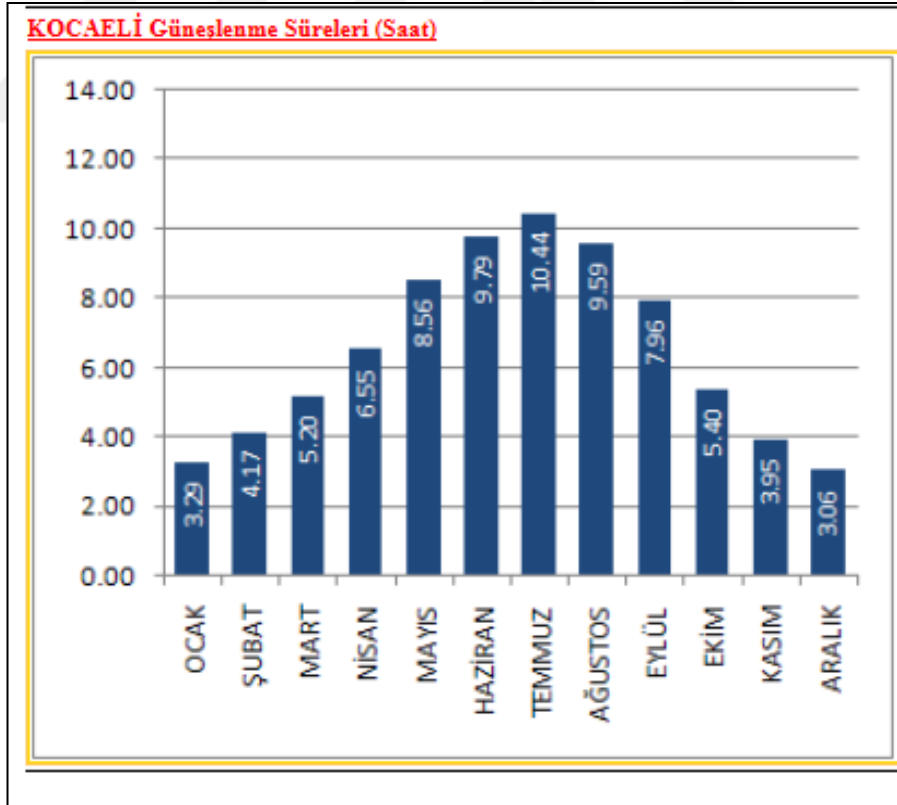
Kocaeli'nin ortalama günlük global güneş ışınım değerinin ve ortalama günlük güneşlenme sürelerinin aylara göre dağılımı sırasıyla Şekil 1.7 ve Şekil 1.8'de görülmektedir.

Global ışınım değerleri incelendiğinde en düşük değer Aralık ayında $1,21 \text{ kWh/m}^2.\text{gün}$ olduğu en yüksek değer ise $5,98 \text{ kWh/m}^2.\text{gün}$ olarak Haziran ayında olduğu görülmektedir.

Güneşlenme süreleri incelendiğinde ise en kısa güneşlenme süresinin Aralık ayında $3,06$ saat olduğu en uzun güneşlenmenin ise $10,44$ ile Temmuz ayında olduğu görülmektedir.



Şekil 1.7. Kocaeli global ışınım değerleri [8]



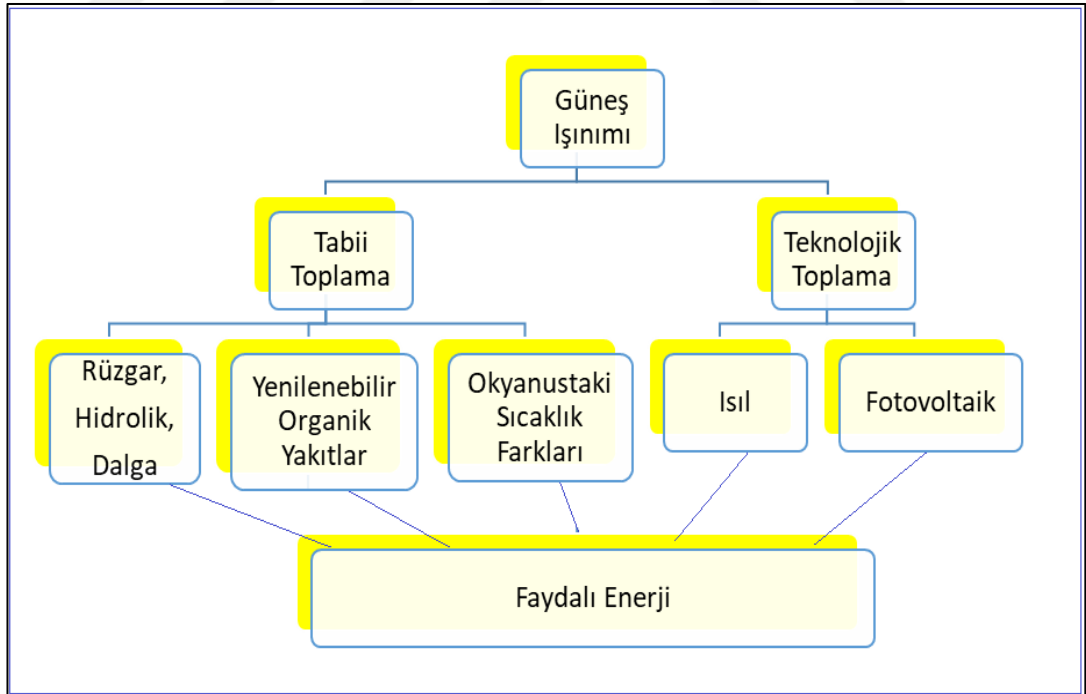
Şekil 1.8. Kocaeli ortalama güneşlenme süreleri [8]

1.4. Güneş Enerjisinin Dönüşümü

Güneş enerjisi, güneşten dünyamıza gelen ve dünya atmosferinin dışında şiddeti 1.367 W/m^2 olarak sabit olan yeryüzünde ise 0 ile 1.100 W/m^2 değerleri arasında olan yenilenebilir enerji çeşididir. Dünyamız her bir saat için güneşten $173 \times 10^{12} \text{ kWh}$ enerji almaktadır [9].

Güneşten dünyaya gelen enerjinin yaklaşık %30'u yansıma ve saçılmalarla uzaya geri gider, yaklaşık %20'si ise atmosfer tarafından soğurulmaktadır. Dünya'ya gelen güneş enerjisi, dünyada kullanılan tüm enerjinin 15-16 bin katı kadardır. Bu durum göz önüne alındığında, dünya yüzeyinde bu enerjiyi olabildiğince verimli ve etkin kullanmanın yollarının araştırılmasının gerekli olduğu görülmektedir [10].

Neredeyse tüm enerji kaynakları güneş ışınımının varlıklar üzerindeki kimyasal ve fiziksel etkisinden oluşmuştur. Rüzgâr enerjisi, dalga enerjisi, hidrolik enerji gibi enerji türleri dolaylı olarak güneş ışınımından oluşan enerjilerdir. Güneş enerjisinden faydalı enerjiye ulaşma metotları Şekil 1.9'da gösterilmiştir [10].



Şekil 1.9. Güneş enerjisinden faydalanma yolları [10]

Güneş dünyaya ulaştıktan sonra doğal ve yapay olarak dönüşümlere uğramaktadır. Toprak, hava ve suyun ısınması, rüzgârın oluşumu, fotosentez oluşumu, doğal

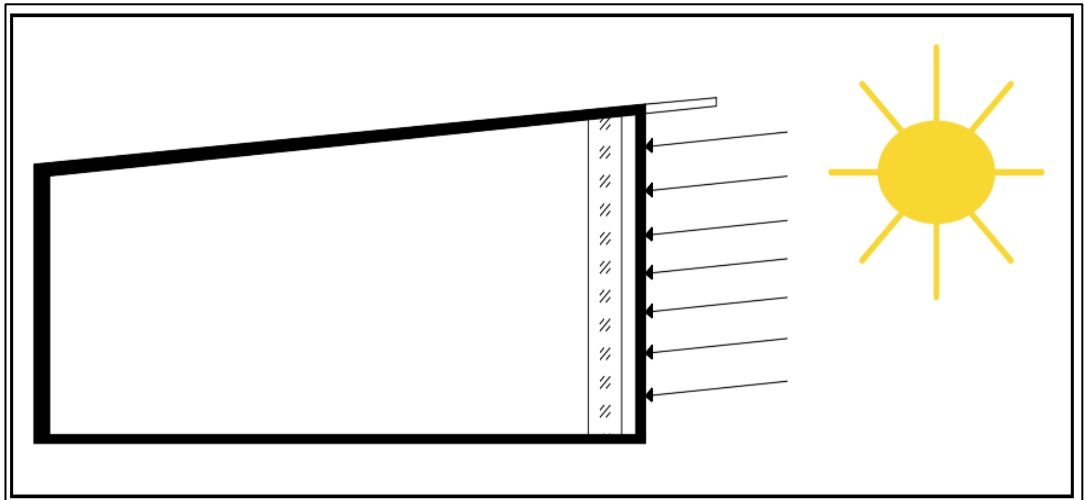
yangınlar ve suyun güneş etkisiyle bir döngüde devam etmesi doğal dönüşümlerdendir. Yapay dönüşümler ise insanlar tarafından geliştirilen yöntemlerle güneş enerjisinin dönüştürülmesi ve böylelikle insanlığın hizmetine sunulmasıdır.

Güneş enerjisi teknolojileri metot, kullanılan malzeme ya da teknolojik düzey yönüyle çok çeşitlilik göstermekte olup iki temel gruba ayrılabilir:

1. Isıl (termal) güneş teknolojileri: Bu tür sistemlerde öncelikli olarak güneş enerjisinden ısı enerjisi elde edilir. Bu enerji direkt olarak kullanılabilceği gibi elektrik üretimi amacıyla da kullanılabilir.
2. Güneş pilleri: Fotovoltaik piller olarak da adlandırılan bu yarı iletken malzemeler güneş ışınımını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürürler [11].

Isıl güneş teknolojileri ise aktif ve pasif ısıtma sistemleri olarak iki ayrı grupta incelenebilmektedir.

Pasif güneş enerjisi sistemleri, yazın minimum kışın ise maksimum ısıyı, herhangi bir fan ya da pompaya ihtiyaç duymadan binada yer alan yapı elemanlarını kullanarak depolayacak şekilde tasarlanmış olan sistemlerdir. Bunu sağlayabilmek için genelde binaların güney cephelerinin uygun olarak tasarlanması gerekmektedir. Kış bahçeleri, güney yüzeyin güneşi maksimum alabilmesi için geniş cam yüzeyleri ya da trombe duvar olarak adlandırılan özel tasarımlar bu grupta yer almaktadır. Tarihte çok eski zamanlardan beri pasif sistem birçok şekillerde kullanılmagelmiştir. Şekil 1.10'da basit bir pasif sistem görülmektedir.



Şekil 1.10. Basit bir pasif sistem

Aktif ısıtma sistemleri olarak düzlem kolektörler; ki bunlar ısıyı toplayan ünitelerde genellikle, ısıyı soğuran yüzeyi metal veya plastik malzemelerden oluşan, örtülü (cam veya plastik) veya örtüsüz düzlem toplayıcılarıdır. Yoğunlaştırıcı kolektörler ve güneş havuzları da aktif ısıtma sistemleri arasında sayılmaktadırlar. Bu sistemlerde ısı taşıyıcı akışkan olarak hava, su vb. gibi akışkanlar kullanılabilir.

Aktif ısıtma sistemlerinde güneşten gelen enerji, toplayıcılar vasıtasıyla depolanır. Depolanan ve belli bir sıcaklığa ulaştırılan akışkan daha sonra sistemde yer alan fanlar veya pompalar yardımıyla kullanılmak istendiği yere gönderilir. Bu yer kullanım amaçlı ısıtılması istenen bir su deposu olabileceği gibi ısıtılması istenen bir mekân da olabilir. Ya da başka bir zamanda ısıyı kullanmak üzere depolayan bir ısı deposu da olabilmektedir. Ülkemizde kullanma suyu ısıtmasında kullanılan, su ısıtan bir güneş kolektörü sistemi en bilinen örneklerdendir.

1.5. Güneş Kolektörleri

Güneş kolektörleri güneşten yeryüzüne gelen enerji yüklü güneş ışınımını ısı enerjisine dönüştüren araçlardır. Bu dönüşüm için öncelikle ışık tayfları kolektörün geçirgen yüzeyinden (cam, plastik gibi) geçer ve kolektörün yutucu yüzeyi tarafından yutulur. Yutulan ısı, kolektör içerisinde kullanılmakta olan ve ısı transferini sağlayacak olan akışkana (su, hava, yağ ya da özel karışımlar) aktarılır [12].

Akışkana doğru iletim ve taşınım ile ısı transferi olur. Kolektörün dış yüzeyinden çevreye ise ısı taşınım katsayısı ve yüzey sıcaklığına bağlı olarak taşınım ile ısı transferi gerçekleşir. Soğurulan ışınım ile çevreye olan ısı kaybı arasındaki fark, yararlanılan güneş enerjisidir ve ısıtılmak istenilen akışkana bu ısı aktarılır [10].

Düzlemsel güneş kolektörlerinden elde edilen anlık faydalı enerji Denklem (1.2) ile ifade edilmektedir [13];

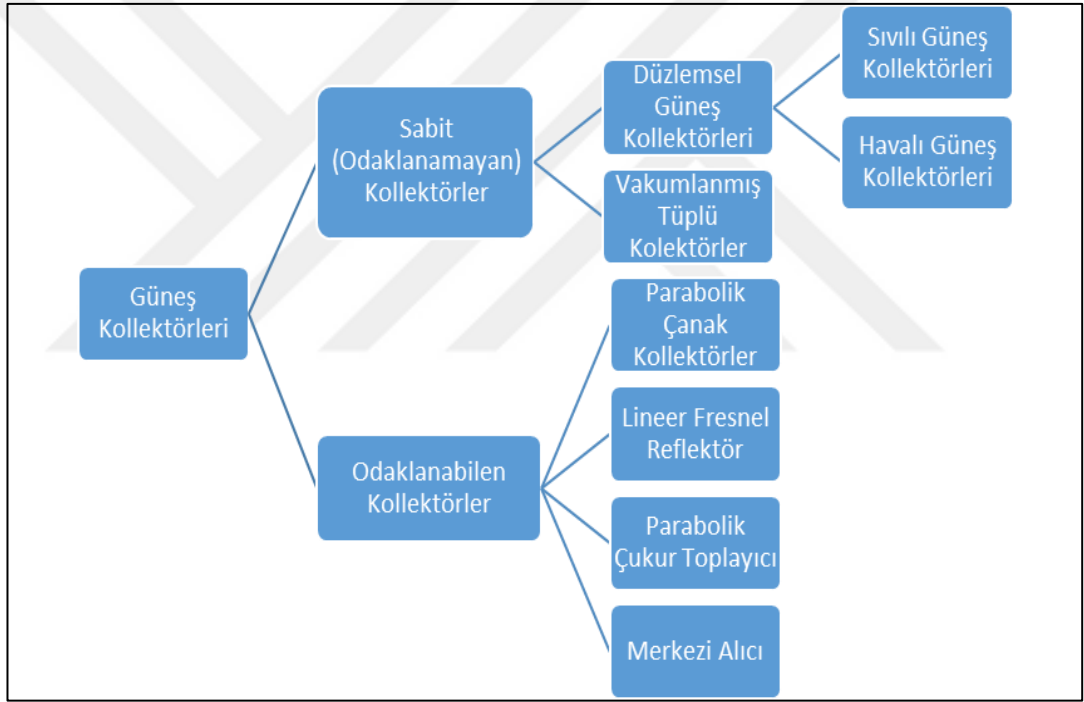
$$Q_U = F_R A_C [(I(\tau\alpha)) - U_L(T_i - T_A)] \quad (1.2)$$

Anlık faydalı enerji (Q_U), kolektör yüzey alanı (A_C), güneş ışınımı miktarı (I), saydam örtünün ışınım geçirme oranı (τ) ve yutucu yüzeyin güneş ışınımını yutma oranı (α) gelen güneş ışınımının açısına ve kullanılan malzemenin özelliğine bağlıdır. Kolektörün toplam ısı geçiş katsayısı olan (U_L) ve sıcaklık farkı ($T_i - T_A$), bütün

levhanın (T_i) sıcaklığında olduğunu kabul edilerek kolektör levhasından dış ortama olan ısı kaybını ifade etmektedir. Güneşten sağlanan gerçek kullanılabilir enerji miktarı ile hesaplanan miktar arasında oluşan fark, ısı verimi katsayısı (F_R) ile giderilmektedir [12].

Kollektöre gelen anlık güneş ışınımı (I); direkt güneş ışınımı, yayılı güneş ışınımı ve yansiyarak gelen güneş ışınımı olmak üzere üç ışınım bileşeninden oluşur; [12].

Sabit ve odaklanabilen güneş kolektörleri olmak üzere kolektörler iki ana başlıkta sınıflandırılabilir. Bu kolektörler de kendi içerisinde sınıflara ayrılmıştır. Şekil 1.11’de görülmektedir [10].



Şekil 1.11. Güneş kolektörlerinin sınıflandırılması [10]

Sabit güneş kolektörleri düz yüzeye sahip olup, güneş ışığını odaklamamaktadırlar. Odaklanabilen güneş kolektörleri ise genellikle iç bükey bir yüzeye sahiptirler. Güneş ışınının merkezi, artan ışınım değişiminden dolayı çok küçük bir bölgede ışınım maruz kalır. Yalnızca direkt ışınımından faydalanır ve yüksek sıcaklık sağlayabilirler. Bu kolektörlerin çalışabilmesi için güneş görmeleri şarttır, bu sebeple odaklanabilen kolektörler güneşlenme açısından zengin bölgelerde daha etkin ve verimli kullanılabilirler [10].

Güneş ışınımını ısı enerjisine dönüştüren bir kolektörün verimi için üç olay esastır. Birincisi gelen güneş ışınımının kolektör tarafından yutulmasıdır. İkincisi bu emilen ısının çevreye olan ısı kaybıdır. Üçüncüsü ise emilen ısı enerjisinin akışkana aktarılmasıdır. Bu üç faktör tasarımda kullanılacak ana ölçütlerdir [12].

1.5.1. Odaklanabilen güneş kolektörleri

Odaklanabilen güneş kolektörleri, güneşten gelen ışınları bir merkezde toplamaya yararlar. Güneş ışınlarının geniş bir kısmı çok küçük bir alan üzerinde yoğunlaştırılarak yüksek sıcaklıklar elde edilebilir [10].

Bu kolektörlerde kullanılan çalışma akışkanı, düz plakalı sistemlere göre daha yüksek sıcaklıklara çıkabilmektedir. Böylelikle daha yüksek termodinamik verim elde edilebilmektedir [10].

1.5.2. Sabit güneş kolektörleri

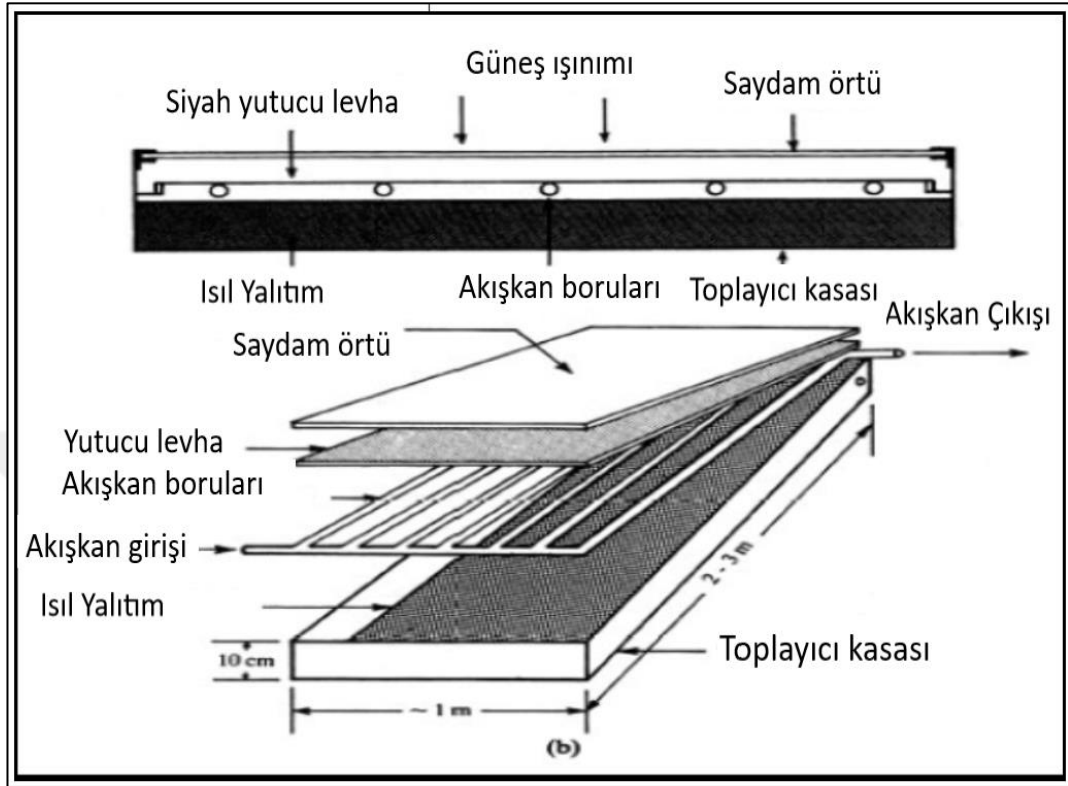
Güneşi en fazla alabilecekleri açıda ve yönde sabit olarak konumlandırılmışlardır ve güneşi izlemezler. Bunlar ekvatora tam dönük vaziyette yani kuzey yarım kürede güneye doğru, güney yarım kürede ise kuzeye doğru yönlendirilirler. Sabit kolektörler düzlemsel kolektörler ve vakumlanmış tüplü kolektörler olarak ikiye ayrılmaktadırlar. En çok kullanılan tip olan düzlemsel güneş kolektörleri Şekil 1.11’de görüldüğü üzere sıvı akışkanlı ve hava akışkanlı güneş kolektörleri olmak üzere kendi içlerinde iki tipe ayrılmaktadırlar [10].

Akışkanın seçiminde dikkate alınacak en önemli etken güneş enerjili ısıtma sisteminin kullanım amacıdır. Kullanım amacı konut ısıtma ya da taşınım ile kurutma ise sistemlerde hava akışkanlı kolektörler, kullanım amacı evsel veya endüstriyel sıcak su temini ise sıvı akışkanlı toplayıcılar tercih edilir. Yüksek sıcaklık uygulamalarında sıvı akışkan olarak su yerine daha iyi ısı geçişi özellikleri sağlayan ısı transfer yağları da kullanılmaktadır [12].

1.5.2.1. Sıvı akışkanlı güneş kolektörleri

Düzlemsel güneş kolektörleri günümüzde en çok kullanılan kolektör tipidir. Çünkü 100 °C’ye kadar olan uygulamalara enerji sağlamak açısından en uygun ve en

ekonomik olan kollektör tipidir. İmalatı diğer kollektör tiplerine göre daha basittir ve piyasada birçok değişik model bulunmaktadır (Şekil 1.12) [12].



Şekil 1.12. Düzlemsel güneş toplayıcısının kesit ve açılmış görünüşü [12]

1.5.2.2. Hava akışkanlı güneş kollektörleri

Hava akışkanlı güneş kollektörlerinde; güneş ışınımı ısı transfer akışkanı olarak kullanılan hava vasıtasıyla ısı enerjisine dönüştürülür. Hava akışkanlı güneş kollektörlerinde ısıtılan hava doğrudan (mekân ısıtması, tarım ürünlerinin kurutulması vb.) veya güneşin olmadığı zaman dilimlerinde ısı enerjisi ihtiyacını karşılamak üzere bir ısı deposundan geçirilmek suretiyle dolaylı olarak kullanılabilir [14].

Hava, özgül ısısı düşük olduğundan dolayı suya göre iyi bir ısı transfer akışkanı olmadığı için hava akışkanlı güneş kollektörlerinin verimi sıvılı akışkanlı kollektörlerin verimine oranla daha düşüktür. Isı transferini sağlamakta kullanılan bu iki tip akışkanın termofiziksel özelliklerinin farklılığından dolayı kollektörlerde avantaj ve dezavantajlar oluşmaktadır [10].

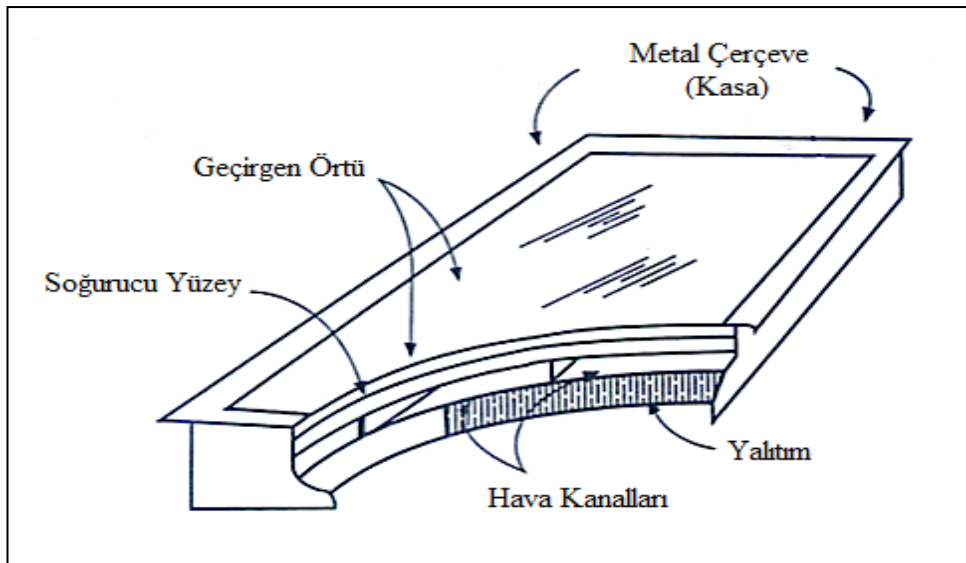
Hava akışkanlı güneş kollektörleri birçok yönden klasik (geleneksel) ısı eşanjörlerinden farklılıklar göstermektedir. Klasik ısı eşanjörlerinde akışkandan

akışkana olan yüksek miktardaki ısı transferi, taşınım ve iletimle gerçekleşmektedir. Hava akışkanlı güneş kolektörlerindeyse ısı transferi, uzak mesafede bir konumda, güneş ışınımı yayan bir enerji kaynağından havaya doğrudur [10].

Basit olarak düzlemsel hava akışkanlı güneş kolektörü, ısıyı soğurmak maksadı ile siyah bir cisim gibi davranan düzlemsel bir plaka ile bu plaka üstüne yerleştirilmiş olan bir ya da birden fazla geçirgen örtüden (cam vb.) meydana gelen bir yapıdır. Geçirgen örtü dışındaki kolektör bölümlerinin, enerji kayıplarını mümkün olduğunca azaltmak amacıyla, çok iyi yalıtılması gerekmektedir. Geçirgen örtü ile (cam, plastik vb. gibi), çevreye olan ışınım ve taşınım ile olan ısı kayıpları azaltılmakla birlikte, güneş ışınımının içinden geçerek plaka ile geçirgen örtü arasında kalan hacimde tutulması ya da siyah yüzey tarafından ısının soğurulması sağlanır. Böylece elde edilen ısı, ışınımı soğuran siyah yüzey ile geçirgen örtü arasına yerleştirilmiş olan kanal içerisinde dolaştırılmakta olan havaya transfer edilir [10].

Şekil 1.13'te görüldüğü üzere hava akışkanlı güneş kolektörleri genelde dört ana kısımdan oluşmuştur. Bunlar [10];

- Kollektör örtüsü,
- Yutucu plaka,
- Yutucu yüzey kaplamaları,
- Kollektör kasası ve yalıtımıdır.



Şekil 1.13. Hava akışkanlı güneş kolektörünün şematik görünüşü [10]

2. ENERJİ DEPOLAMA

Enerji depolama metotlarının geliştirilmesine yönelik çalışmalar son yıllarda hızla artmaktadır. Özellikle yenilenebilir enerjiye yönelmekle birlikte, güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kesikli olmasından dolayı enerji depolama yöntemlerinin geliştirilmesi kaçınılmaz olmuştur. Enerji depolama sistemlerinin enerji verimliliği ve etkinliğinin artırılmasında önemli bir potansiyeli bulunmaktadır [15].

Enerji depolama sistemlerinin başlıca yararları; enerji maliyetlerinin azaltılması, enerji tüketiminin düşürülmesi, yatırım ve bakım maliyetlerinin azaltılması, çalışma esnekliğinin artırılması, iç hava kalitesinin artırılması şeklinde sayılabilir [15].

Enerji depolama sistemleri sürekli değişmekte ve gelişmektedir. Bununla birlikte gelişmeler istenen seviyede değildir. Enerji mekanik, elektriksel, kimyasal ve ısı olmak üzere değişik biçimlerde depolanmaktadır.

2.1. Mekanik Enerji Depolama

Mekanik enerji depolama sistemleri şu şekilde sıralanabilir;

- 1-Hidrolik enerji depolama sistemleri
- 2-Sıkıştırılmış hava ile enerji depolama sistemleri
- 3-Volan ile enerji depolama sistemleri.

Sıkıştırılmış hava ve hidrolik enerji depolama sistemlerinden büyük ölçekli enerji depolama uygulamalarında faydalanılmaktadır. Volanlar ise daha çok orta ölçekli enerji depolama sistemleri için uygundur. Depolama fazla güç üretimi olduğunda gerçekleşir ve güç üretiminin yetersiz kaldığı zaman dilimlerinde sisteme aktarılır [30]. Başka bir ifadeyle de mekanik enerji, yüksek bir cismin potansiyel enerjisi, doğrusal veya dönele bir hareketin kinetik enerjisi, sıkıştırılmış gazlarda enerji veyahut elastik bir cismin sıkıştırma ya da gerdirme enerjisi olarak depolanabilir [15].

2.2. Elektrik Enerjisi Depolama

Bataryaları kullanarak enerji depolama elektrik enerjisini depolamak için bir seçenek oluşturmaktadır. Batarya bir doğru akım devresine bağlanarak şarj edilir ve enerji depolanmış olur. Enerji ihtiyacı olduğunda deşarj edilerek depolanmış kimyasal enerji elektrik enerjisine dönüştürülür. Bataryaların kullanım alanı ihtiyaç fazlası güçlerin daha sonra kullanılmak üzere depolanmasıdır. Rüzgâr türbinlerinden ve güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik panellerden elde edilen elektrik enerjisinin depolanmasıdır. En çok kullanılan batarya türleri kurşun-asit ve Ni-Cd'dir [17].

2.3. Kimyasal Enerji Depolama

Kimyasal enerji bileşiklerin oluşturduğu bağlarda depolanır ve ekzotermik reaksiyonlar yoluyla bu enerji yeniden kazanılarak açığa çıkan enerji kullanılabilir. Bir ya da daha fazla kimyasal bileşikten oluşan, bir formdan diğer forma geçerken enerjiyi depolayan veya depoladığı enerjiyi yayan sistemlerdir. Bunu sağlamak için bazen bir katalizör kullanmak gerekebilir. Kimyasal depolamada en çok hidrojen ve amonyak kullanılmaktadır [15].

Suyun elektrolizi ile hidrojen gazı elde etmek mümkündür; böylelikle enerji depolanmış olur. Gerektiği zaman diliminde de yakıt hücreleri (pilleri) veya ısı sistemlerinde hidrojen kullanılarak, depolanmış olan enerji gerekli yerlerde kullanılmış olur [15].

2.4. Isıl Enerji Depolama

Isıl enerji; duyulur ısı, gizli ısı, kimyasal reaksiyon ısısı (termokimyasal ısı), şeklinde depolanabilir. Kütle (m) olan (C_p) özgül ısısında ve (ΔT) sıcaklık farkında depolanan duyulur ısı (Q_D) [9];

$$Q_D = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

En çok kullanılan duyulur ısı depolama malzemeleri; su, kayalar, organik yağlar, seramikler ve tuz eriyikleridir. Malzemelerin seçiminde etkili olan faktörler; ucuz

olması, kolay temin edilebilmesi ve yüksek ısı kapasitesine sahip olması gibi özelliklerdir.

Faz değişimi geçiren, kütlesi (m) olan bir malzemede gizli ısı ile depolanan ısı enerji, (Q_G) [9];

$$Q_G = m\lambda \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada (λ) faz değiştirme ısıdır [9].

Isı depolama metodunun seçimi temel olarak, ısı depolamanın süresi, ekonomik uygulanabilirliği ve işletme şartlarına bağlıdır. Bir ısı depolama sistemi uygulaması için ısı depolama metodunun belirlenmesi, ısı depolamanın etkinliği ve ekonomikliği sistemin tasarımıyla yakından ilgilidir. Isı depolama sistemleri tasarımlarında;

1. Isı depolamada kullanılacak malzemenin birim hacim ya da kütlesinin ısı depolama kapasitesi,
2. Isı depolama, ısıyı geri kazanma sıcaklığı ve metodu,
3. Isı depolama ve ısıyı geri kazanma işlemleri için enerji ihtiyacı,
4. Sıcaklık farkı,
5. Sistem bileşenlerinin boyutlandırılması,
6. Isı deposunda kullanılan malzeme, ısı deposunun şekli, boyutları ve düzenlenmesi,
7. Depolama ünitesinin ısı kaybına karşı yalıtımı ve ısı kayıplarının kontrolü,
8. Depolanan enerjinin kullanılacağı ortam şartları ve özellikleri,
9. Kurulan sistemin toplam maliyeti,

etkenleri göz önünde bulundurulur [16].

Faz değiştiren, katı halden sıvı hale veya sıvı halden katı hale geçen bir depolama sisteminde, depolama malzemesinin kimyasal yapısında bir değişiklik olmamak koşuluyla sabit basınçta depolanan ısı enerji, termodinamiğin birinci kanununa göre şöyle yazılabilir [16];

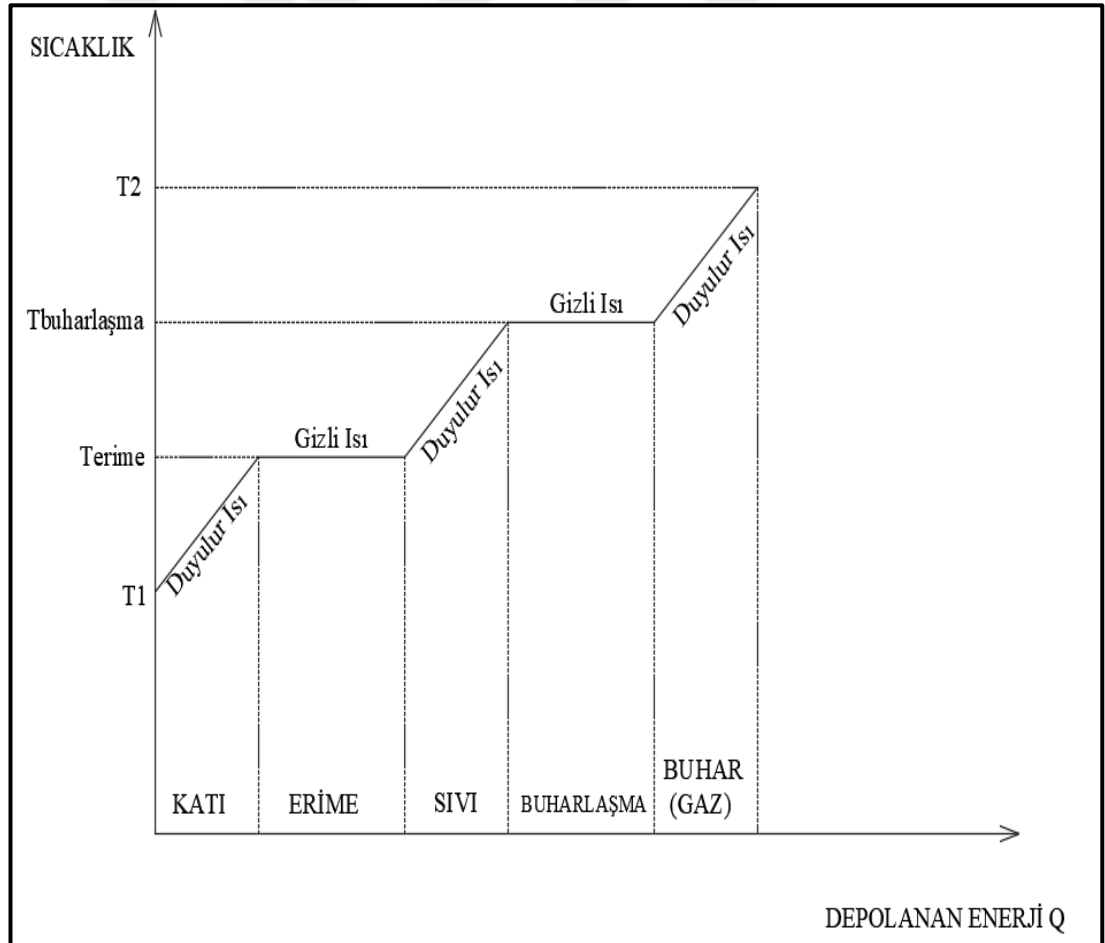
$$Q_S = m.[C_K(T_e - T_1) + h_{KS} + C_S(T_2 - T_e)] \quad (2.3)$$

Bu denklemde (h_{KS}) erime gizli ısıdır. (C_K) ve (C_S) sırasıyla katı ve sıvı hallerinde sabit basınçta özgül ısıları, (T_1) katı haldeki maddenin ilk bulunduğu sıcaklıktır. (T_e)

maddesin erime sıcaklığı (T_2) sıvı hale geçen maddesin son halde ulaştığı sıcaklığı, (m) ise malzemenin kütlesini göstermektedir [16].

Isıl enerji maddenin sıcaklığı artırılarak, faz değişimi olmadığı durumda ısı kapasitesiyle ve faz değişimi sırasında ise sabit sıcaklıkta erime gizli ısıyla depolanmaktadır. Maddenin ısı kapasitesi kullanılarak ısının depolanmasına “duyulur ısı depolanması”, maddenin hal değişimi (faz değişimi) esnasında ısı depolanmasına da “gizli ısı depolaması” adı verilmektedir. Isı enerjisi depolama işlemi buharlaşma ısı ve gazlarda duyulur ısı depolanmasıyla da yapılabilmektedir fakat sabit basınçta hacim veya sabit hacimde basınç çok arttığından tercih edilmemektedirler [16].

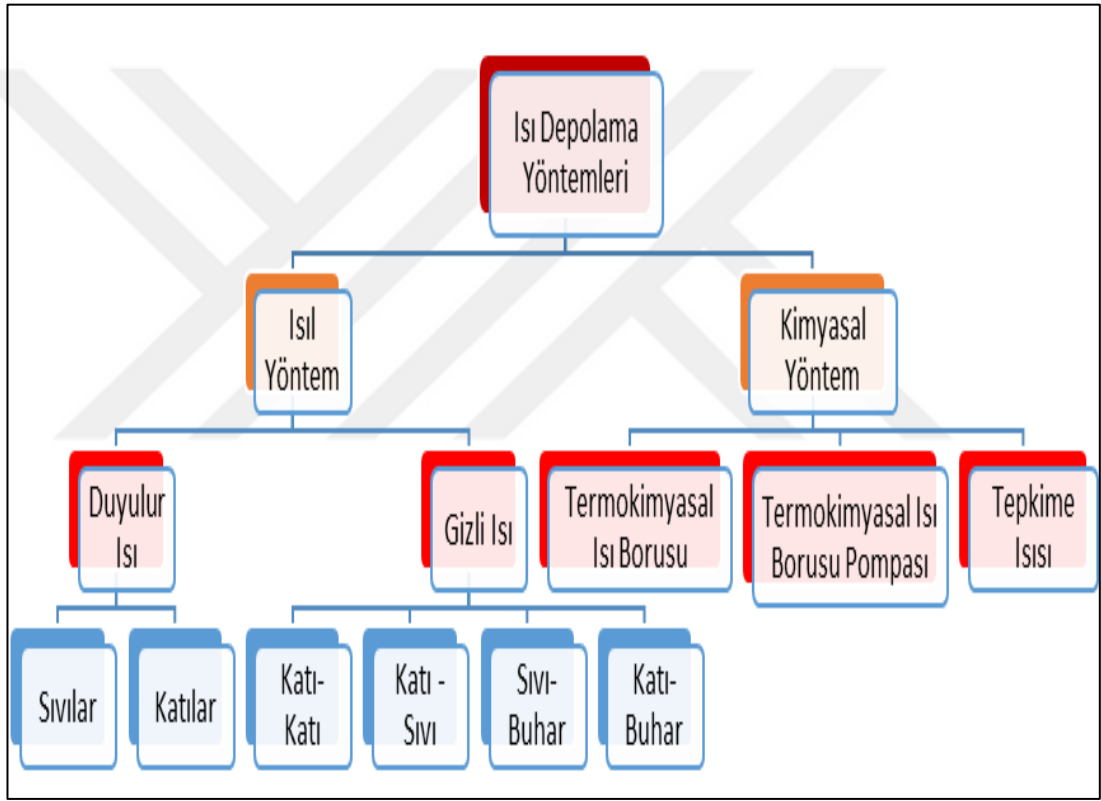
Maddenin faz değişimi esnasındaki enerji depolama miktarı ile sıcaklık arasındaki ilişki Şekil 2.1’de görülmektedir [16].



Şekil 2.1. Maddenin faz değişimi esnasındaki enerji depolama, sıcaklık grafiği [16]

Genelde birim hacim için iç enerji değişimi fazla olan ısı depolama malzemelerinin (istenen işletme sıcaklığındaki faz değiştiren maddelerin) kullanılması halinde, ısı depolamak amacıyla kullanılacak olan hacim azalmaktadır. Güneş enerjisinin 0 ila 90 °C sıcaklık aralığında, düşük sıcaklıklarda, termal enerji olarak depolanmasında kullanılan yöntemler Şekil 2.2’de görülmektedir [16].

Güneş enerjisi depolama sistemlerinin en önemli yapısal bileşenleri; ısıyı toplayan birim, ısıyı depolayan birim, ısı eşanjörü, depolanan ısının yararlanılacağı ortam, yardımcı enerji kaynağı, kontrol sistemi, birimlerinden meydana gelmektedir [16].



Şekil 2.2. Isı depolama yöntemleri [16]

Isı depolayan bir sistemde bulunması gerekli olan genel özellikler aşağıda sıralanmıştır [16];

- Isı depolama malzemesinin birim hacim veya kütle için ısı depolama kapasitesi mümkün olduğunca yüksek olmalıdır.
- Isı depolama malzemesi çalışma sıcaklığında uygun özelliklere sahip olmalıdır.
- Depolama biriminin sıcaklığı mümkün olduğunca sabit olmalıdır.
- Isı depolama malzemesi yanıcı, zehirleyici ve korozif özellikte olmamalıdır.

- Isıyı depolama ve depolanan ısıyı geri kazanma oranı yüksek olmalıdır.
- Isıyı depolama ve ısı kazanma faaliyetinde azalma olmadan, depolama ve geri kazanım çevrimi mümkün olduğunca çok sayıda gerçekleşebilmelidir.
- Sistemde depolanmış olan ısı tamamen geri kazanılabilmelidir.
- Sistem mümkün olduğu kadar ucuz ve kullanma süresi uzun olmalıdır.

Ekonomik olarak kabul edilebilir bir depolama sisteminde, ısı depolama maliyeti düşük olmalıdır. Bu durum, ısı depolamada kullanılacak maddelerin maliyetinin düşük olmasının yanı sıra, depo ve ısı değiştirici maliyetlerinin de kabul edilebilir bir düzeyde olmasıyla sağlanabilir. Depolama yapılacak sistemin kapasitesinin belirlenmesinde, güneş ışıınım enerjisi miktarı, kullanılacak sistemlerde gerekli ısı miktarı ve depolama için tüketilen enerji miktarı esas alınır [16].

2.4.1. Duyulur ısı depolama

Sıcaklığı (T_1) ve kütlesi (m) olan bir ısı depolama malzemesinin sıcaklığı faz değişimi olmaksızın (T_2) sıcaklığına yükseltirse ısı kapasitesi dolayısıyla malzemede depolanan duyulur ısı;

$$Q_D = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (2.4)$$

denklemleriyle verilmektedir. Bu denklemde (c_p) sabit basınçtaki özgül ısısını, (V) maddenin hacmini, (ρ) yoğunluğunu gösterir. (ΔT) sıcaklık farkında, belli hacimde depolanan termal enerjinin fazla olması için malzemenin ($\rho \cdot c_p$) değerinin mümkün olduğunca büyük olması gerekir. Bazı malzemelerin termal özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir. Duyulur ısı depolamasında yararlanılan malzemelerin hacimsel özgül ısısının yüksek olmasına ek olarak depolama malzemesi olarak kullanacak maddenin uzun süre (10-15 yıl) bozulmadan özelliklerini koruması, zehirlenme ve korozif etkilerinin bulunmaması, yanma ve alevlenme özelliğinin olmaması, kolay temin edilebilir ve ucuz olması ideal özelliklerdir. Su ve çakıl taşları ucuz, kolay temin edilebilen ve yüksek ısı kapasitesine sahip malzemelerdir. İdeal duyulur ısı depolama özelliklerine sahip olmalarından dolayı uygulamalarda çoğunlukla tercih edilmektedir [16].

Tablo 2.1. Bazı depolama malzemelerinin 300 K sıcaklığındaki özellikleri [18]

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Özgül Isı (J/kgK)	Isı Kapasitesi (10 ⁶ J/m ³ K)
Balçık	1458	879	1,28
Tuğla	1800	837	1,51
Kumtaşı	2200	712	1,57
Oduun	700	2390	1,67
Beton	2000	880	1,76
Cam	2710	837	2,27
Alüminyum	2710	896	2,43
Demir	7900	452	3,57
Çelik	7840	465	3,68
Çakıl taşı	2050	1840	3,77
Manyetit	5177	752	3,89
Su	988	4182	4,17

Isı geçişlerinde $(\rho.c_p)$ çarpanı bir malzemenin ısı kapasitesi olarak isimlendirilmektedir. Sabit basınçtaki özgül ısı (c_p) ve ısı kapasitesi $(\rho.c_p)$; bir malzemenin ısıyı depolama kapasitesini göstermektedir. (c_p) ; birim kütle için $[J/(kgK)]$, $(\rho.c_p)$ ise birim hacim için $[J/(m^3K)]$ birimleri geçerli olmaktadır. Zamana bağlı olan ısı geçişinde önemli başka bir malzeme özelliği de ısı yayılım katsayısıdır (α) . Isı yayılım katsayısı, ısının bir malzeme içinde ne kadar hızlı yayıldığını göstermektedir;

$$\alpha = \frac{\text{iletilen ısı}}{\text{depolanan ısı}} = \frac{k}{\rho.C_p} \quad (2.5)$$

Denklemden (k) ısı iletim katsayısını, $(\rho.c_p)$ ısı kapasitesini ifade etmektedir. Yüksek ısı iletim katsayısına ya da düşük ısı kapasitesine sahip olan malzemelerin ısı yayılım katsayıları yüksek olmaktadır. Yüksek ısı yayılım katsayısına sahip olunması; iç ortama ısı yayılımının yüksek olacağını, düşük ısı yayılım katsayısına sahip olunmasıysa; ısının büyük oranda malzeme içinde soğurulacağını göstermektedir. Böyle malzemelerin ısı iletim miktarları da düşük olmaktadır [19].

2.4.1.1. Katı maddelerde duyulur ısı depolama

Isı enerjisi kayalar, taşlar, metaller, beton, kum gibi katılarda duyulur ısı şeklinde, hem yüksek sıcaklıklarda hem de düşük sıcaklıklarda depolanabilir. Katıların donma, kaynama ve kendi kaplarının dışına sızma gibi problemleri bulunmamaktadır.

Katıların ısı iletkenlikleri ve özgül ısıları düşük ise de istenen bazı ideal fiziksel özelliklere sahiptirler. Bunlar; yüksek sıcaklıklarda düşük buhar basıncı ve inert olma özellikleridir. Ayrıca ucuz ve bol miktarda bulduklarından ısı depolayıcı madde olarak kullanılabilirler [20].

Isı enerjisi depolanması için malzeme seçiminde ısı kapasitesi önemli bir parametredir. Isı kapasitesi yüksek olan maddelerden biri dökme (pik) demirdir, fakat pahalı olduğundan depolayıcı madde olarak pek tercih edilmemektedir. Genelde çakıl taşları veya kaya parçaları hem ucuz hem de kolay temin edilebilir olmaları nedeniyle sıklıkla kullanılmaktadır. Düşük sıcaklıklarda ısı transfer akışkanı olarak genelde hava kullanılmaktadır. Taşlar geniş ısı transferi yüzeyine sahip olmaları sebebiyle doğrudan temasla taşlardan havaya ya da havadan taşlara iyi bir ısı transferi sağlamaktadırlar. Buna ilave olarak çakıl taşlarından meydana gelen dolgulu yataktaki ısı kayıpları hava akışının olmadığı zamanlarda çok düşük olmaktadır. Bu sebeple hava zayıf bir ısı ileticisi durumuna gelmektedir. Dolayısıyla ısı deposunun etrafı çok fazla yalıtım gerektirmemektedir. Büyük ısı depoları toprak altına uygun şekillerde yerleştirilebilmektedir. Dolgu yataklı bir sistemde depolanan enerji, ısı depolama malzemesinin termofiziksel özellikleri ile birlikte çakıl taşlarının şekline, boyutuna, yoğunluğuna ve sistemde kullanılan ısı transfer akışkanının özellikleri gibi parametrelere bağlıdır [20].

Çakıl taşları ile ısıyı depolamanın ana bileşenleri; taşların konulduğu depo bölümü, çakıl taşlarını desteklemekte kullanılan gözenekli yapı ve ısı şarjı/deşarjı için hava kanallarından oluşmaktadır. Taş/kaya dolgulu bir ısı deposunda güneş enerjisi depolayabilmek amacıyla, kolektörlerden gelen sıcak hava çakıl taşlarının olduğu bölmeye gönderilerek ısının taşlara transferi sağlanmaktadır. Depolanan bu enerjinin geri alınması çakıl taşlarından havaya yani ısı depolamanın tersi yönde ısı transferiyle sağlanır ve ısıtılacak ortama gönderilir. Genelde bu tür sistemlerin maliyetleri düşüktür. Bu tür depolama sistemlerinin avantajları şunlardır [20]:

- Isı depolama malzemeleri (kum, çakıl taşı, kaya gibi) bol miktarda sağlanabilir, kolaylıkla taşınabilir, yanıcı ya da zehirleyici değildir ve ucuza temin edilebilir.
- Düşük ve yüksek sıcaklıklarda ısı depolama imkânı vardır.
- Yüzey alanlarının büyüklüğü sebebiyle havayla taşlar arasında ısı transferi iyidir.

- Taşların/kayaçların birbiriyle temas yüzeyleri küçük olduğu için iletim yoluyla ısının transferi düşük olmakta, böylece depodan çevreye ısı kaybı az olmaktadır.
- Isı değiştirici kullanılması gerekmez.
- Isı transfer akışkanı olarak hava kullanılması halinde donma, kaynama ve korozyon sorunlarıyla karşılaşmamaktadır.

Bu sistemlerin dezavantajları şunlardır [20]:

- Depolamada kullanılan katı maddelerin su ya da kimyasal ısı depolama malzemelerine göre daha düşük ısıyı depolama kapasitesinde olmasından dolayı depolama hacimleri büyük olmaktadır.
- Özel tasarımlar yapılmadığı durumlarda (fan vb. kullanılması gibi) sisteme kendiliğinden, doğal sirkülasyonla ısı şarjı ve deşarjı mümkün olmamaktadır.
- Dolgulu yatakta basınç düşmesinin yüksekliği sebebiyle hava sirkülasyonunun enerji maliyeti yüksek olmaktadır.
- Bazı durumlarda tozlanma, yoğuşma, küflenme ve haşarat sorunları oluşabilmektedir.
- Çakıl taşları depoya konulduktan sonra deponun temizlenmesi ve bakımlarının yapılması külfetlidir.

Uygulamalarda ısı depolamalarında, çapları 2 ile 5 cm arasında değişen çakıl taşları kullanılmaktadır. Malzemelerin özellikleri incelendiğinde çakıl taşları, beton, granit, tuğlalar ve magnezyumlu tuğlalar bu tür depolamalarda uygun görülerek kullanılan malzemelerdendir [20].

2.4.1.2. Sıvı maddelerde duyulur ısı depolama

Duyulur ısı depolama için birçok sıvı madde tabiatta bol miktarda bulunmaktadır. Duyulur ısı depolama maddelerinden olan bazı sıvıların termofiziksel özellikleri Tablo 2.2’de verilmiştir. Sıvılarda ısı depolama teknolojisi basittir. Sıvı maddeler içerisinde su, ucuz ve bol bulunduğu için güneş enerjisinin duyulur ısıyla depolamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Suyun özgül ısısının yüksek olması nedeniyle yalıtımı uygun olarak yapıldığında, birim hacimde yüksek miktarda termal enerji depolamak mümkün olmaktadır. Depolama tankları genelde beton, çelik, alüminyum, fiberglas ve fiberglas katkıli plastik malzemeden yapılmaktadır. Depolar

korozyona karşı dirençli olduklarından ısı depolama için uygun özelliklere sahiptirler. Yaklaşık olarak 350 °C'ye kadar olan ısı depolaması uygulamalarında değişik özelliklere sahip organik sıvılar kullanılabilir [16].

Organik sıvılarda ısı depolama sıcaklığı üst sınırının belirlenmesinde depolama tankının yapıldığı malzeme ile oluşacak kimyasal etkileşimin yanında sıvının fiziksel özellikleri daha fazla etkilidir. Bu sıvıların özgül ısıları yüksek olmakla birlikte hacimsel olarak ısı depolama kapasiteleri eriyik tuzlardan daha düşüktür. Organik sıvılar kısmen pahalı olmakla birlikte basınçlı kapların kullanılmasına gerek olmadığından sıcaklığın orta düzeyde olduğu uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Daha yüksek sıcaklıktaki (200-800 °C) ısı depolanması uygulamalarında inorganik sıvılar arasından belirli sıvı metaller ile eriyik tuz karışımları kullanılabilir. Sıvı metaller yüksek sıcaklıklarda uygun olarak depolanabildiklerinden ısı geçişi ve kimyasal kararlılık açısından uygun özelliklere sahiptir. Korozif özellikte değildirler ve özgül ısıları düşüktür. Isı geçiş hızının yüksek olmasının istendiği uygulamalarda sıvı metaller yüksek sıcaklıkta ısı depolama için uygun malzemelerdir [16].

Tablo 2.2. Bazı sıvı maddelerin termofiziksel özellikleri [16]

Sıvı Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Özgül Isı (J/kgK)
Su	1000	4190
Su-Etilen glikol 50/50	1050	3479
Caloria HT 43*	-	2300
Dowterms A*	867	2200
Therminol 55*	-	2400
Therminol 66*	750	2100
Etilen Glikol	1116	2382
Hitec**	1680	1560
Draw**	1733	1550
Lityum***	510	4190
Sodyum***	960	1300
Etanol	790	2400
Propil asit	800	2500
Bütanol	809	2400
İzobütanol	808	3000
İzopentanol	831	2200
Oktan	704	2400
*Madeni yağ, **Erimiş tuz, ***Sıvı metal		

Sıvılarda duyulur ısı depolanmasında en çok kullanılan maddeler arasında belki birinci sırada su yer almaktadır. Suda duyulur ısı depolanmasının avantajlarından bazıları şunlardır [16]:

- Su kolay temin edilebilir ve ucuzdur.
- Enerji depolanmasında kullanılmakla birlikte enerji toplayıcı akışkan olarak da kullanılabilir.
- Fiziksel, kimyasal ve termodinamik özellikleri iyi bilinmektedir.
- Isı depolama kapasitesi yüksektir.
- Akışkan dinamiği ve ısı geçişi özellikleri iyi bilinmektedir.
- Isıtma ve soğutma sistemleri için gereken çalışma sıcaklığı aralıklarında kararlı bir buhar dengesine sahip durumdadır.
- Zehirlenme ve alevlenme riski taşımamaktadır.
- Korozif etkiyi azaltmakta kullanılan inhibitörler gelişmiş durumdadır.

Duyulur ısı depolamasında su kullanılmasının böyle avantajları olmasına rağmen birtakım dezavantajları da mevcuttur. Su donduğu zaman hacmi genişlediği için, donmaya karşı önlem alınması gereklidir. Korozif etkisi bulunduğu için depo içerisine inhibitörlerin eklenmesi gerekebilir. Yüksek sıcaklıkta termal enerjinin depolanması zordur [16]. Bir su tankının sistem olarak belirlendiği durumda enerji dengesi aşağıdaki gibi yazılabilir;

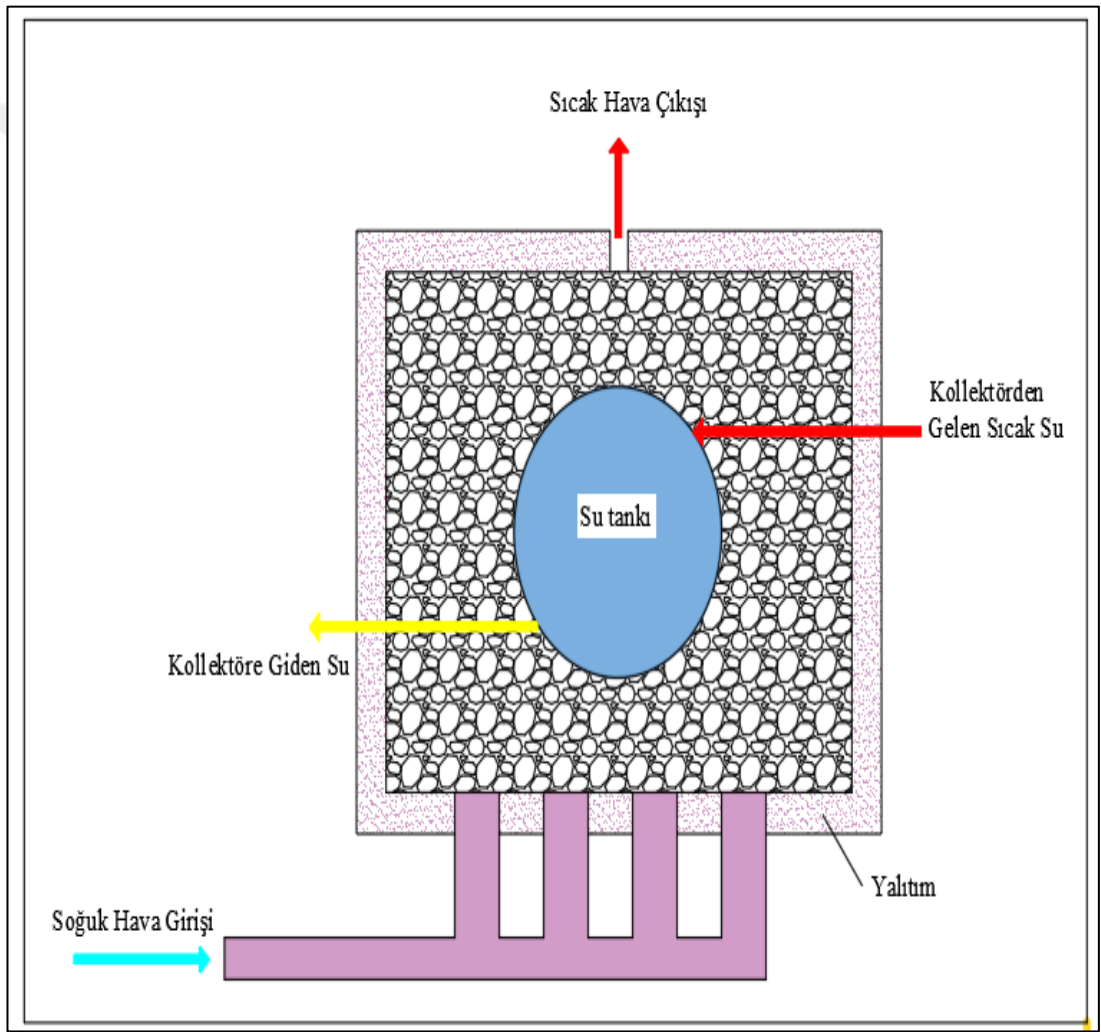
$$(mC_p) \frac{dT}{dt} = Q_g - Q_y - Q_k \quad (2.6)$$

Denklemden (Q_g) kolektörden gelen ısı miktarını, (Q_y) ihtiyaç için çekilen ısı miktarını (Q_k) depodan çevreye olan ısı kaybını, (m) kütle, (C_p) sabit basınçta özgül ısıyı ifade etmektedir. Denklem (2.6)'dan da görüleceği üzere, tanktaki su sıcaklığının zamana bağlı değişimi ($\frac{dT}{dt}$) suyun ısı kapasitesiyle tanka gelen, tanktan çekilen ve kayıp olan ısı miktarına bağlıdır [16].

2.4.1.3. Katı ve sıvı maddeleri kullanarak ısı depolama

Isı depolamalarında katı ve sıvı maddelerin birlikte kullanılmasıyla ısı depolamada etkinliği artırılabilir. Böyle bir sisteme etrafı taş parçalarından oluşan dolguyla çevrelenen su tankından oluşan bir sistem örnek gösterilebilir [16].

Su ile kayaçların birlikte kullanıldığı en uygun tasarımlardan biri Harry Thomasson yöntemidir (Şekil 2.3). Bu sistemde kollektörlerde ısıtılmış olan su, deponun üstünden girmektedir. Daha sonra ısı enerjisini aktararak soğumuş olan su, dibe çökerek yeniden kollektöre dönmektedir. Su tankının etrafı kayaçlarla çevrilidir ve hava bu kayaçların arasından geçerek ısınmakta sonrasında ise ısıtılacak mekâna gönderilmektedir. Isı deposunun etrafı yalıtkan duvarlardan oluşmuştur. Bu sistemin üstün tarafı, ısı kapasitesi yüksek olan suda ısı depolama avantajı ile havayla temas yüzeyini artırmış olan kayaçların birlikte kullanılmış olmasıdır [19].



Şekil 2.3. Harry Thomasson yöntemi ile enerji depolama [19]

2.4.2. Gizli ısı depolama

Gizli ısı, maddelerin faz değiştirirken ortamdan aldığı veya ortama verdiği ısı enerjisidir. Isının depolanması katı-sıvı, katı-katı, sıvı-buhar ve buhar-katı

dönüşümleriyle yapılabilmektedir [21]. Bununla birlikte en sık kullanılan yöntemin sıvı-katı dönüşümü olduğu görülmektedir. Ayrıca değişik kristal örgüye sahip katılar kristal örgü durumundaki değişim kullanılarak ısı alıp verebilmekte katı-katı dönüşüm yöntemi kullanılabilir. Katı-gaz ve sıvı-gaz dönüşümleri gizli ısının çok yüksek olması açısından avantajlı olmalarına rağmen gazlarda hacim değişimi çok fazla olduğu için ısı depolamada tercih edilmemektedir [21].

Maddelerin faz değişimleri sırasında iç enerjilerindeki sabit sıcaklıkta artış meydana gelirken ısı depolanır. Bütün malzemeler faz değiştirir, ancak birçok malzemenin faz değişim sıcaklığı arzu edilen aralıkta değildir [16].

Isı olarak eriyen ve bu şekilde faz değiştiren maddelerde hem gizli ısı depolama hem de duyulur ısı depolama yapılabilmektedir [16].

Gizli ısıyı kullanarak ısı depolamak için gereken depo hacmi, duyulur ısıyı kullanarak ısı depolamak için gereken depo hacminden 4–5 kat daha küçük olmaktadır. Suyu örnek verecek olursak; suyun gizli ısısu suyun duyulur ısısının seksen katıdır. Yani 1 kg buz eritmek için gereken ısı enerjisi 1 kg su sıcaklığını 1 °C yükseltmek için gereken ısı enerjisinden seksen kat daha fazladır. Dolayısıyla gizli ısı kullanımı ısı deposu tasarımlarında büyük bir avantaj sağlamaktadır. Böylelikle enerji dönüşümleri ve ısı depolamada maliyetler de azaltılmış olmaktadır. Faz değiştiren maddeler arzulanan sıcaklık aralıklarında ısıyı depolamayı sağlar. Isıtma ve soğutma uygulamalarında faz değiştiren maddeler erime sıcaklığına bağlı olarak kullanılabilirler [21].

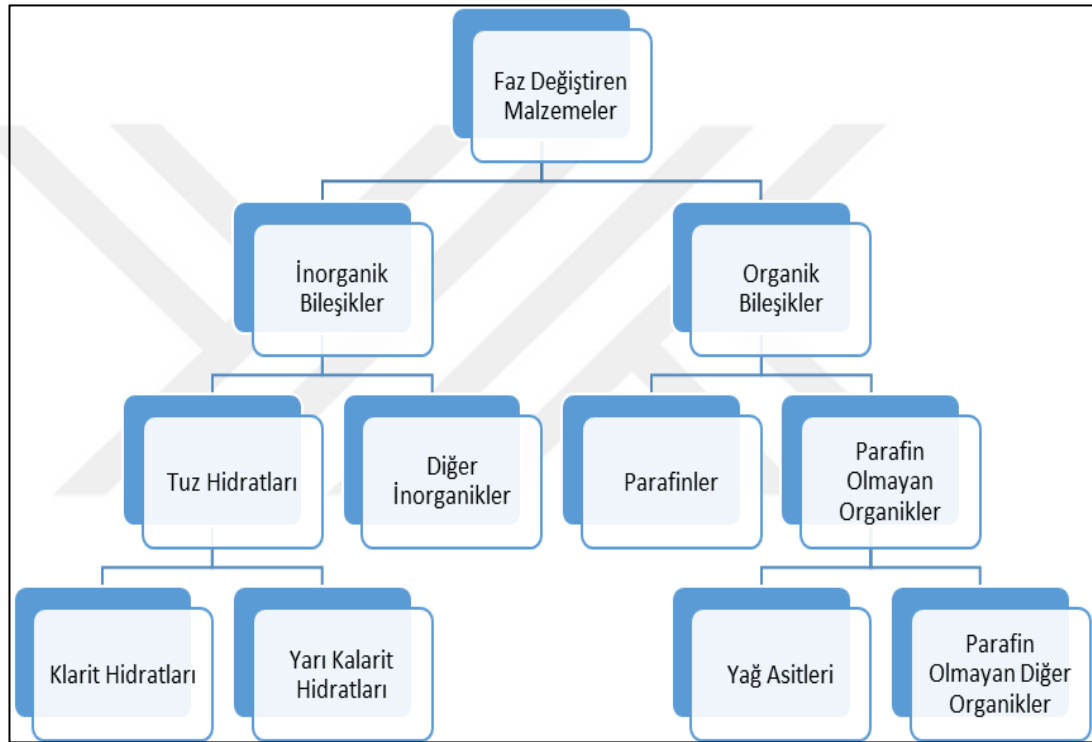
Gizli ısı depolama yöntemleri; ısı deposu hacminin küçük olması arzu edilen durumlarda, enerjinin yüksek yoğunlukta ve yüksek kapasitede olması gereken hallerde, kısa süreli ısı depolamalarında ve sabit ya da küçük sıcaklık aralıklarında ısı depolama arzu edilmesi durumlarında uygulanmaktadır [21].

Gizli ısı depolama sistemleri;

- Faz değiştiren madde olarak kullanılacak olan ısı depolama malzemesinin seçilmesi,
- Faz değiştiren maddede depolanmış olan ısı enerjisinin kullanılacak ortama transferi için ısı eşanjörü tasarlanması olarak temel iki aşamadan oluşmaktadır [21].

2.4.2.1. Faz değiştiren maddeler (FDM)

Maddelerin faz değiştirmesi sırasındaki gizli ısıdan yararlanarak ısı enerjisinin depolanmasında kullanılan malzemeler faz değiştiren maddeler (FDM) olarak adlandırılmaktadır. FDM'ler sabit bir sıcaklık aralığında depolama imkânı sağladığı gibi, erime sıcaklığına bağlı olarak ısıtma ve soğutma amaçlı uygulamalarda kullanılabilirler. Faz değiştiren maddeler inorganik bileşikler ve organik bileşikler olarak ikiye ayrılmaktadırlar (şekil 2.4) [22].



şekil 2.4. Faz değiştiren malzemelerin sınıflandırılması [22]

Parafinler, oda sıcaklığı şartlarında mum kıvamında olup yüksek oranda ağır hidrokarbonlardan oluşmuş olan FDM'lerdir. Parafin waxlar kimyasal olarak başlıca zincir sonlarında 2-metil grupları gibi dūřuk miktarda kuvvetli zincire sahip bulunan hidrokarbonlardan oluşmaktadır. C_nH_{2n+2} formülüyle ifade edilen parafinler pek çok özellikleri ile birbirlerine benzerler. Oda sıcaklığı ve atmosfer basıncında ilk dōrt alkan (metandan (CH_4)-pentana (C_5H_{10})) gaz haldedir. Karbon sayısı C_5 ile C_{15} arasındaki parafinler sıvı fazda, diğerleri ise wax (mum) olarak katı fazda bulunmaktadır. Parafin waxın yapısındaki n-alkan genel olarak %75' in üzerinde olup bu oran %100'e kadar ulaşabilmektedir Parafinlerin yapısındaki alkanların zincir uzunluklarına bağlı olarak dallanmış (izo-alkan) veya dūz zincirli (n-alkan) olabilmektedir. [23].

Saf parafinler yalnızca alkanlardan oluşmakta olup en çok bilinen parafin oktadekandır ($C_{18}H_{38}$). Alkanların erime gizli ısıları ve erime sıcaklıkları karbon sayısının artmasına bağlı olarak artmaktadır. C_{14} - C_{40} arasındaki alkanların erime sıcaklıkları 6 ile 80 °C arasında değişmekte olup bunlar genel olarak “parafinler” olarak adlandırılmaktadır [23].

Parafinler, erime gizli ısılarının yüksek olması ve sıcaklık aralıklarının çok geniş olması sebebiyle gizli ısı depolama maddeleri olarak nitelendirilmektedirler. Bazı parafinlerin özellikleri Tablo 2.3’te sunulmuştur. Parafinler temini kolaydır ve genel olarak maliyetleri tuz hidratlardan daha yüksektir. Metal kaplarda korozyona neden olmadıklarından dolayı gizli ısıyla enerji depolama sistemlerinde tuz hidratlara göre tercih edilirler [23].

Parafinler faz değiştiren madde olarak aşağıdaki üstün özelliklere sahiptirler [23]:

- Erime sırasında faz ayrışması görülmez.
- Kolayca temin edilebilmektedirler.
- Kimyasal olarak kararlı yapıdadırlar.
- Erime gizli ısıları yüksektir.
- Yüksek erime gizli ısısına sahiptirler.
- Erime sıcaklıkları geniş bir aralıkta yer almaktadır.
- Korozyona sebep olmazlar ve zehirlenme yapmazlar.
- Buhar basınçları düşüktür.
- Aşırı soğuma yapmadıklarından çekirdekletiricilerin kullanılması gerekmez.
- Maliyetleri düşüktür.
- Yoğunlukları düşüktür.
- Erimeleri sırasında hacimlerindeki değişim küçüktür.

Parafinlerin dezavantajları ise şunlardır [23]:

- Isıl iletkenliği düşüktür.
- Erime sıcaklıkları sabit değildir.
- Yanıcıdırlar.

Tablo 2.3. Bazı parafinlerin özellikleri [23]

Bileşik	"C" atomu sayısı	Erime noktası (°C)	Yoğunluk (kg/m ³)	Isıl iletkenlik (W/mK)	Gizli ısı (kJ/kg)
n-Dodekan	12	-12	750	0,21 ^K	-
n-Tridekan	13	-6	756		-
n-Tetradekan	14	4,5-5,6	771		231
n-Pentadekan	15	10	768	0,17	207
n-Hekzadekan	16	18,2	774	0,21 ^K	238
n-Heptadekan	17	22	778		215
n-Oktadekan	18	28,2	814 ^K , 775 ^S	0,35 ^K , 0,149 ^S	245
n-Nonadekan	19	31,9	912 ^K , 769 ^S	0,21 ^K	222
n-Eikosan	20	37			247
n-Heneikosan	21	41			215
n-Dokosan	22	44			249
n-Trikosan	23	47			234
n-Tetrakosan	24	51			255
n-Pentakosan	25	54			238
Parafin wax	-	32	785 ^K , 749 ^S	0,514 ^K , 0,224 ^S	251
n-Hekzakosan	26	56	770	0,21	257
n-Heptakosan	27	59	773		236
n-Oktakosan	28	61	910 ^K , 765 ^S		255
n-Nanokosan	29	64			240
n-Triakontan	30	65			252
n-Hentriakontan	31		930 ^K , 830 ^S		-
n-Dotrikontan	32	70			-
n-Tritrikontan	33	71			189

K:katı; S:sıvı

Bitkisel yağlar, hayvansal yağlar ile yağ asitleri ısı depolama malzemesi olarak kullanıma uygun maddelerdir. Yemeklik yağlar ile soya yağları yüksek oranda stearik, palmitik, oleik ve linoleik asit içermektedirler. Yağ asitleri, inorganik ve organik faz değiştiren maddelerin yerlerine alternatif olabilirler [24].

Tuz hidratları, inorganik bileşiklerden faz değiştiren maddelerdir. Isıl enerjiyi depolama kapasiteleri yüksek olduğu için önemli ısı depolama malzemeleri arasında

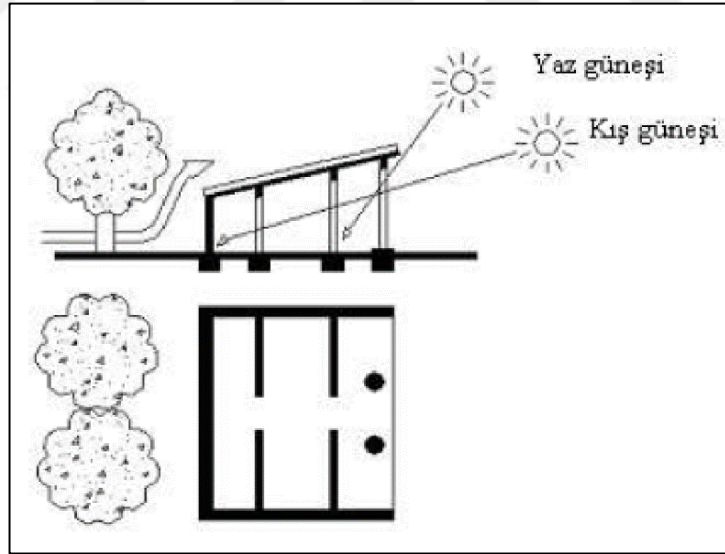
yer almaktadırlar. Kullanılma sıcaklık aralıkları 0 ile 150 °C arasında değişmektedir. Erimleri ya da donmaları sırasında hacimlerindeki değişim az olup, ısı iletkenlikleri organik faz değiştiren maddelere göre yüksektir [24].

Organik ve inorganik bileşiklerin ötektikleri, erime ve donma noktaları sabit gizli ısı depolama malzemeleridir. Karışımlarının erime sıcaklık aralıkları ve erime gizli ısıları düşük olmakla birlikte bazı ötektiklerin erime gizli ısıları yeterli seviyededir. Ötektik karışımlarının kullanım nedeni, maddelerin erime sıcaklık aralıklarını arzulanan sıcaklık aralığındaki sınırlara çekip faz değiştiren madde olarak kullanılabilmesini sağlamaktır. Bunu yaparken de erime gizli ısıdaki düşüşün kabul edilebilir olması gereklidir. Hem inorganik bileşiklerin hem de organik bileşiklerin ötektik karışımları bulunmaktadır [24].

3. LİTERATÜR TARAMASI

3.1. Güneş Enerjisinden Termal Enerji Olarak Yararlanılmasının Tarihçesi

Güneş binlerce yıldır insanlığı onların hiçbir çabası olmadan ısıtmaktadır. Güneşin bilinçli şekilde ısıtma amaçlı kullanılması çok eskilere dayanmaktadır. Kullanılan bazı pasif metotlar milattan yaklaşık dört yüz – beş yüz yıl önce (Şekil 3.1) güneşten yararlanma ve korunma bilinci olduğuna dair ip ucu vermektedir. Yaşam alanları oluşturulurken cephesi güneşe bakan böylece kış güneşini içeriye alabilen aynı zamanda yaz mevsiminde güneş ışınlarının çatıların üstünden geçtiği ve yapının gölgede kaldığı tasarımlar yapılmıştır. Kış güneşinden yararlanmak için güney cephelerin yüksek, soğuk rüzgârlardan korunabilmek için de kuzey cephelerin alçak yapılması ise kullanılan pasif yöntemlere gösterilebilecek diğer örneklerdir [25].



Şekil 3.1. Pasif metot kullanılmış ev [25]

Milattan sonra 1. yüzyıl ile 4. yüzyıl arasında Roma hamamlarını ısıtmak için güneyde geniş cam yüzeyler kullanılmıştır. 6. yüzyılda konutlarda ve kamu binalarında bol pencere mekanlar yaygınlaşmıştır [26].

1800'lü yıllarda misafirlerin ağırlandığı kış bahçeleri popüler olmuştur. 19. yüzyılda Endüstri Devrimiyle birlikte şehirlerde dar gelirli kesim için inşa edilen sağlıklı

konutların barınma şartları, 1830-1840 yıllarında görülen kolera salgınının da etkisiyle, yapılan yasal düzenlemelerle iyileştirilmiş ve söz konusu konutlar yenilenmiştir. Konutlara güneş ışığı ve temiz hava sağlanmasına önem verilmiş, yeni yapılarda bol güneş ışığı alacak şekilde geniş cam yüzeyler kullanılmıştır [26].

Bugünkü manasıyla güneş enerjisi sistemleri üzerine yapılan çalışmalar 1938 yılından itibaren başlamaktadır. 1938 yılından sonra bu konularla ilgili modern araştırma ve uygulama teknikleri geliştirilmeye çalışılmıştır. Özellikle 1940'lı yıllardan sonra, Massachusetts Institute of Technology (MIT)'den bir çalışma ekibi, bu konuda yaptıkları uygulamalarla, çeşitli düzenlemelerle günümüzde halen kullanılan kolektörlerin performansını hesaplayacak çeşitli metotlar geliştirmişlerdir [16]. MIT Üniversitesinde inşa edilen güneşle ısıtılan evlerde yapılan ölçümler ve araştırmalar 1939'dan 1978'e kadar devam etmiştir. Kampüs yerleşkesinde yapılan ve Solar I adı verilen ev, güneşle ısıtılan Amerika'da yapılmış ilk ev olarak kabul edilmektedir (Şekil 3.2). Sonrasında Solar II, Solar III, Solar IV, Solar V ve Solar VI güneş evleri de yapılarak çalışmalara devam edilmiştir [27].



Şekil 3.2. Solar I adı verilen ve Amerika'da yapılmış güneşle ısıtılan ilk ev olarak kabul edilen yapı [27]

Türkiye’de yapılan çalışmalar incelendiğinde ise güneş enerjisi ile ilgili ilk ulusal kongrenin 1975 yılında İzmir’de yapıldığı görülmektedir.

Kaynaklarda, güneşten pasif olarak yararlanmak maksadıyla yapılan ilk güneş evi olarak, 1975 yılında ODTÜ de yapılan ve Şekil 3.3’te görülen güneş evine rastlanmaktadır [28].



Şekil 3.3. Türkiye’de ilk yapılan güneş evi olan ODTÜ güneş evi [28]

Sonrasında, Çukurova Üniversitesinde 1981’de, Ege Üniversitesinde 1986’da güneş evleri yapılmıştır. 1991’de İzmir’in Hatay semtinde kamusal özellik taşıyan bir kültür merkezi, 1993’te Ankara Yenimahalle’de Ankara Güneş Evi ve 1994’te İzmir Güzelbahçe’de Kemal Demiröz Evi yapılmıştır. Erciyes Üniversitesi 1996’da Kayseri’de, Hacettepe Üniversitesi 2003’te Ankara’da Güneş Evi yapmıştır. Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğüne 2006’da, Ankara’da Trombe duvarlı Enerji Verimliliği Eğitim Tesisi yaptırılmıştır. 2007 yılında Pamukkale Üniversitesi Temiz Enerji Evi ve 2008 yılında AB fonu desteğiyle Diyarbakır Güneş Evi yapılmıştır [29, 30].



Şekil 3.4. Diyarbakır güneş evi [30]

3.2. Yapılan Uluslararası Çalışmalar

Taş/kaya yataklarının ısıtılması ve soğutulması ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Bu konudaki ilk analitik çalışma 1929'da yayımlanmış olan Schumann'ın çalışmasıdır. Bu tür taş/kaya yatakları genellikle Schumann Modeli olarak adlandırılmaktadır [31]. Schumann modeline göre yatak ve akışkan için oluşturulan diferansiyel denklemler tezin beşinci bölümünde verilmiştir.

Schmidt ve Willmot (1981) paket yataklarda ısı depolama ile ilgili yaptıkları çalışma sonucunda, taşlarla yapılan depolamada basınç düşümünün önemli bir dezavantaj oluşturduğunu ve basınç düşümünün fazla olması durumunda fanın daha fazla enerji harcayacağını belirtmişlerdir [32].

Coutier ve Farber (1982), yaptıkları teorik çalışmada bir taş/kaya yatağı içinde ısı transferinin diferansiyel denklemlerinin çözümü için bir yöntem sunmuşlardır. Termal kayıplar ve iletim etkisi gibi olayları hesaplamak üzere bir model geliştirmişler ve araştırma sonuçlarını eğriler ve ampirik denklemler olarak sunmuşlardır. Hava hızı, parça çapı ve geometrik özellikler gibi parametrelerin optimum değerlerini tespit ederek taş/kaya yataklarının depolama tasarımlarında faydalanılmasını amaçlamışlardır [33].

Sagara ve Nakahara (1991), hava akışkanı kullanana güneş enerjili ısıtma sistemlerinde, taş/kaya yatağı içerisinde oluşan sürtünme kayıpları nedeniyle sistemden elde edilecek faydanın azalacağını belirtmişler ve düşük sürtünme kaybı elde etmek amacıyla büyük taş/kaya partikülleri üzerine çalışmışlardır. Taş/kaya yatağındaki ısı geçişi için teorik bir model geliştirmişlerdir [34].

Hasnain (1998) gözden geçirme (review) makalesinde duyulur ve gizli ısı ile sıvı ve katı maddelerde termal ısı depolanmasının tekniklerinden bahsetmiştir. Çalışmasında suyun 25-90 °C aralığında iyi ısı depolanabilen ucuz bir madde olduğunu belirtmiştir. Yine taşlar ve kayaçların düşük ve yüksek sıcaklıklarda termal ısı depolayabilecek malzemeler olduğunu ve taşların boyutlarının 1-5 cm arasında olması gerektiğini vurgulamıştır [35].

Crandall ve Thacher (2004), standart yöntemlerle kaya/yaş yataklarının şarjı durumunda, öğleden sonra kollektör çıkış sıcaklığı azaldığından yatak içerisindeki katmanlaşmanın azaldığını belirtmişlerdir. Depolama yatağını bölümlere ayırarak tabakalaşmayı korumaya yönelik bir yöntem sayısal olarak incelenmiştir [36].

Günerhan (2004) ısı enerjisi depolama ve kayalarda/taşlarda ısı enerjisini depolanması üzerine çalışma yapmıştır. Bazalt taşının ısı depolama özelliğinin yüksek olduğu ve çakıl taşı gibi ısı depolama malzemesi olarak kullanılmasının mümkün olduğunu belirtmiştir [19].

Sethi ve Sharma (2008) çalışmalarında, literatür tarama sonucuna göre seralarda ısı depolama ortamı olarak en çok çakıl taşlarının tercih edildiğini, sera sıcaklığının yaklaşık 4 ila 10 °C dış sıcaklıktan yüksek olması ile seranın yıllık enerji ihtiyacının %20 ile %70 arasında sağlanabileceğini tespit etmişlerdir [37].

Singh ve arkadaşları (2008) taş/kaya yatağının performansını belirlemek amacıyla bir simülasyon çalışması yapmıştır. Simülasyon çalışmasının yürütülmesi için beş farklı şekilde, büyüklükte depolama malzemesi elemanları kullanılmıştır [38].

Mawire ve arkadaşları (2009) yağ-çakıl taşı modelini çalışmışlardır. Depolama ortamı olarak silika cam, alumina ve paslanmaz çelik kullanmışlardır. Bu malzemelerin termal performansı aksel sıcaklık dağılımı, depolanan toplam enerji, depolanan toplam ekserji ve şarj verimliliği açısından değerlendirilmiştir. Sadece yağ-çakıl-yatak sistemlerinin termal performansı için önemli olan depolanan toplam enerji miktarının değil, aynı zamanda depolanan ekserji miktarının ve termal tabakalaşma derecesinin de dikkate alınması gerektiğini ifade etmişlerdir. Toplam ekserji ile depolanan toplam enerji oranının yüksek olması, ısı depolama malzemesi olarak çakıl malzemesinin ısı performansının iyi olduğunun bir ölçüsü olacağını ifade etmişlerdir [39].

Hänchen ve arkadaşları (2011), ısı transfer akışkanı olarak havayı kullanmışlar ve taş/kaya dolgulu yatak için ısı transfer modeli geliştirmişler ve bunu deneysel olarak doğrulamışlardır. Odaklanmış güneş enerji sistemiyle yüksek sıcaklıkta çalışmışlardır. Depolama ortamı olarak magnezyum silikat kullanılmıştır. Parametre olarak dolgulu yatağın boyutları, akışkan debisi, partikül çapı ve katı faz materyali kullanılarak şarj/deşarj, günlük döngüsel işletme, toplam termal verim ve kapasite oranını

değerlendirmişlerdir. Sistemin sürekli çalışması halinde, en uygun verimlilik şartlarında genel verimliliğin %90'ı aştığı belirtilmiştir. Sabit çevrimsel duruma, yaklaşık yirmi günlük zaman diliminde 6 saat şarj ve 6 saat deşarj sonrasında ulaşılabilmektedir. Parçacık boyutları değerlendirmesinde, en küçük partikül boyutu için en yüksek verimlilik bulunmuştur [40].

Zanganeh ve arkadaşları (2012) depolama ortamı olarak taş/kaya kullanılan pilot bir termal depolama sistemini inşaa etmiş, test etmiş ve modellemişlerdir. Isı deposu kesik bir koni şeklinde tasarlanmıştır. Akışkan ve katı fazlar için kararsız enerji denklemlerini çözen bir dinamik, sayısal ısı transfer modeli geliştirilmiş ve deneysel olarak doğrulanmıştır. Toplam ısı kayıpların giren enerjinin %0,5'inin altında kaldığı, deşarj sırasındaki çıkış sıcaklığının 590 °C'nin üzerinde kaldığı ve toplam termal verimin %95'e ulaştığı ifade edilmiştir [41].

Tian ve arkadaşları (2013) gözden geçirme (review) makalesinde, güneş enerjisi termal uygulamaları üzerine güneş kolektörleri ve termal enerji depolama alt sistemlerini incelemişlerdir. Makalede konsantre olmayan tipler ve konsantre tipler de dahil olmak üzere çeşitli güneş kolektörleri tartışılmıştır. Üç farklı tipte yoğunlaştırıcı güneş kolektörü tanımlanmış ve karşılaştırılmıştır. Bunlar; heliostat alan toplayıcılar, parabolik çanak toplayıcılar ve parabolik oluklu toplayıcılardır. Yüksek sıcaklıklı termal enerji depolama sistemleri için kullanılan malzemeler karşılaştırılmış ve farklı termal depolama sistemleri kategorileri arasında karşılaştırma yapılmıştır. İyi özelliklere sahip erimiş tuzların, yüksek sıcaklıklı termal depolama uygulamaları için ideal malzemeler olduğu belirtilmiştir. Bu uygulamalardaki zayıf ısı transferinin üstesinden gelmek için ısı transferi olayının geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Son olarak, mevcut güneş enerjisi santrallerinin mevcut durumu, gelecekteki olası araştırma ve geliştirme alanları gözden geçirilmiştir [42].

Yaıcı ve arkadaşları (2013), termal güneş enerji sistemlerinde kurulu bir sıcak su depolama tankının şarj işlemi sırasında çeşitli tasarım ve işletim parametrelerinin etkisini araştırmak için 3 boyut CFD (hesaplamalı akışkanlar dinamiği) simülasyonları gerçekleştirmişlerdir. Akış davranışı, termal tabakalaşma ve sistem performansı analiz edilmiştir. CFD modeli, literatürde mevcut deneysel veriler karşısında doğrulanmıştır. Sayısal sonuçlar ve deneyler arasında iyi bir uyum olduğu ifade edilmiştir. Bu

çalışmada kullanılan modelin güvenilir olduğunu ve tabakalı su depolama tankları için termal performansı tatmin edici bir şekilde tahmin edebileceğini ifade etmişlerdir [43].

Zavattoni ve arkadaşları (2014), zamana bağlı üç boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları kullanarak, yüksek sıcaklıklı bir kaya yatağı TES sistemini boyutlandırmayı ve modellemeyi amaçlamışlardır. Isı transfer akışkanı olarak hava kullanan sistem, 80 MW_e'lik endüstriyel ölçekli bir güneş enerjisi santralının günün 24 saati enerji gereksinimlerini karşılamak için kullanılmaktadır. Sayısal model, 6,5 MWh'lık termal enerji depolama sistem prototipinden alınan deneysel verilerle doğrulanmıştır. Termal enerji depolama prototipi, ortalama eşdeğer çapı 3 cm olan, yaklaşık 25 m³'lük homojen nehir kayaları (kuvarsit, kireçtaşı, kalkerli kumtaşı, gabro ve helvetik silisli kireçtaşı) ile doldurulmuş yalıtımlı bir beton kaptan oluşmaktadır. CFD simülasyonları Fluent kodları ile ANSYS'de gerçekleştirilmiştir [44].

Bouadila ve arkadaşları (2014) çalışmalarında, Tunus'ta bir serada, güneş enerjisini faz değiştiren maddelerde depolayarak gece kullanmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda sera sıcaklığının gece 5 °C arttığı, nem oranının %10-20 oranında düştüğü gözlenmiştir. Toplam ısınma gereksiniminin %31'ini karşıladığı da tespit edilmiş olup yapılan imalatlarının geri ödeme süresinin ise yaklaşık 5 yıl olduğu hesaplanmıştır [45].

Bruch ve arkadaşları (2014), ısı transfer akışkanı olarak termal yağ ve birincil depolama malzemesi olarak kaya ve kum karışımı kullanılarak çift ortamlı ısı depolama sisteminin hidrolik ve termal davranışlarını incelemek için özel bir deneysel kurulum yapmışlardır. Depolama tankı 1 m çapında ve 3 m yüksekliğindedir. Bu termal enerji depolama alanının deneysel ve sayısal araştırması yapılmıştır. Kütle akış hızı, şarj ve deşarj sıcaklığı farkı ve kısmi yükün etkileri, boyutsuz aksel sıcaklık profili üzerinde önemli bir etki yaratmadan test edilmiştir. Sayısal üç boyutlu simülasyonlar ticari kod Fluent kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel verilerle yapılan ilk karşılaştırmalar sonucunda, modelde bazı iyileştirmelere ihtiyaç duyulsa da modelin iyi seviyede olduğunu ifade etmişlerdir [46].

Zanganeh ve arkadaşları (2014), taş/kaya yataklı ve yüksek sıcaklıkta yapılacak ısı depolama sistemi için deşarj sırasında çıkan akışkan sıcaklığını dengede tutabilmek

için deponun üst kısmında faz değiştiren madde kullanılması şeklinde bir konfigürasyon önermişlerdir. Tasarladıkları deponun üst kısmında faz değiştiren madde kullanmışlar, ısıyı hem duyulur olarak hem de gizli ısı şeklinde depolamışlardır. Toplam depolama hacminin %1,33'lük kısmında faz değiştiren madde kullanılarak gizli ısı ile depolama yapıldığı ve toplam termal enerjinin %4,4'üne karşılık gelen buradaki enerji ile deşarj sırasındaki sıcaklık düşüşünün olumsuz etkisinin bu şekilde giderildiğı ve stabilizasyonun sağlandığı ifade edilmiştir [47].

Schlipf ve arkadaşları (2015), dolgu yataklı ısı depolama sistemlerinin, odaklanmış güneş enerjisi santrallerinin maliyetlerinin düşürülmesi için büyük bir potansiyel sunduğunu ve çakıl veya silis kumu gibi uygun maliyetli ve yerel kullanılabilir depolama malzemelerinin kullanılmasının bu tür sistemler için önemli bir faktör olduğunu ifade etmişlerdir. Aynı zamanda sistemin şarj ve deşarj sırasındaki performansı ile ilgili olarak, depolama malzemelerinin büyük bir etkisi olduğunu vurgulamışlardır. Yaptıkları çalışmada küçük taneli depolama malzemelerini teorik modeller ve deneysel sonuçlar kullanarak araştırmışlardır. Termal enerjiyi depolamak için silika kumu, kuvars çakıl veya bazalt gibi küçük taneli malzemeler kullanarak dolgulu bir yatak sistemini analiz etmişlerdir. Böyle bir sistemin sıcaklık aralığının oldukça geniş olduğı ve genel şarj davranışını etkilemeden 550 °C'ye kadar depolama yapmanın mümkün olduğunu belirtmişlerdir. Deneysel sonuçlara dayanarak, paketlenmiş yatak içinden sıcaklık davranışı için basitleştirilmiş bir model geliştirilmiştir [48].

Erregueragui ve arkadaşları (2016), depolama ortamı olarak kuvarsitin kullanıldığı, ısı transfer akışkanı olarak ise palm yağının kullanıldığı bir termal depolama sistemi üzerinde çalışmışlardır. Orta derece sıcaklıkta termal depolama için doğal beton ve sertifikalı sürdürülebilir yağ kullanan çevre dostu bir depolama sistemi sunmayı amaçlamışlardır. Dolgu yatak termal enerji depolama için iki fazlı bir dinamik model sunulmuştur. Geliştirilen model kullanılarak, palm yağı performansı, iki farklı sentetik yağ ile karşılaştırılmıştır. Palm yağının, 300 °C'nin altında bir çalışma sıcaklığı için bir ısı transfer sıvısı olarak verimli bir şekilde kullanılabileceğı ifade edilmiştir [49].

Warkhade ve arkadaşları (2016), güneş enerjisini beton ortamda depolayan bir termal ısı deposu tasarımı ve deneysel değerlendirmesi üzerine çalışmışlardır. Isı transfer akışkanı olarak havanın kullanıldığı sistemde depolama ortamında kullanılacak beton; küp, silindir ve küre şekillerinde değiştirilerek ısı depolaması yapılmıştır. Kütle akış hızı arttıkça, sıcaklık dağılımının zamanla arttığı ve kütle akış hızı azaldığında, yataktaki sıcaklık dağılımının yavaş olduğu ifade edilmiştir [50].

Casetta ve arkadaşları (2016), hava akışkanının ısı transferi olarak kullanıldığı bir termal ısı depolama sistemi üzerinden elde edilen hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Enerji depolama için alümina küçük küreler ile dolu bir karbon çelik tank kullanılmıştır. Bu çalışma ile termoklin prensibi ile çalışan bir termal enerji depolama sisteminin davranışının daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunulması amaçlanmıştır. Alümina küreleri içeren küçük bir tank üzerinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlar ile, Fluent yazılımı ile gerçekleştirilen simülasyonlardan elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Fiziksel alan, gözenekli bir ortam olarak modellenmiştir. Ancak taşıma sürecini ve paketlenmiş yataktan ısı transferini analiz etmek için kullanıcı tanımlı fonksiyonlar (UDF)'da bir matematiksel model uygulanmıştır [51].

Atalay ve arkadaşları (2017), Golden Delicious tür elmanın kurutulmasını sağlamak üzere hava akışkanı ısıtan kollektör ve buna bağlı taş/kaya dolgulu ısı depolama sistemini geliştirmişlerdir. Yapılan deneylerde elmayı kurutmak için gerekli enerjinin fazlasıyla sağlandığı tespit edilmiştir [52].

Jemmal ve arkadaşları (2017), havanın ısı transfer akışkanı olarak kullanıldığı dolgu yataklı termal ısı depolama sisteminde depolama ortamı olarak kuvarsite ve çakmaktaşı kullanılmış ve bu malzemelerin potansiyelinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu silisli kayalar, mantıksal bir ısı depolama materyalinde gerekli özellikler açısından deneysel bir karakterizasyona tabi tutulmuştur. Bu kayaların jeokimyası ve yapısal özellikleri belirlenmiş ve bazı mekanik özellikleri ölçülmüştür. Sıcaklık değişiminin termal kapasite, termal difüzyon ve termal iletkenlik üzerindeki etkisi de analiz edilmiştir. Karakterizasyon deneyleri, depolama materyalleri olarak silika kayalarının potansiyelini göstermiştir. Termal döngü testlerinin ön sonuçlarına göre kayaların

ömürünün uzun olması için 250 °C'nin üzerinde ısı depolamada kullanılmasının uygun olacağı ifade edilmiştir [53].

Bouhal ve arkadaşları (2017), ağırlıklı olarak güneş enerjili su ısıtma sistemlerinde kullanılan dikey güneş depolama tanklarında termal tabakalaşmayı değerlendirmek amacıyla CFD sayısal çerçevesinin geliştirilmesini amaçlamışlardır. Kullanılan CFD sonuçlarının literatürdeki deney sonuçlarıyla doğrulandığı ve uyum sağladığı ifade edilmiştir. Daha sonra, iki ana depolama tankı konfigürasyonu incelenmiştir. Yapılandırılarda A ve B tankları arasındaki ana fark, tankların içine yerleştirilmiş düz plakaların sayısı, bunların pozisyonları ve eğim açısına ek olarak, yük ve deşarj işleminin gerçekleştirildiği ağızlıkların pozisyonu olarak ifade edilmiştir. Sonuç olarak, sayısal simülasyon sonuçlarının, iki dikey depolama tankı konfigürasyonu için şarj ve deşarj fazları sırasında akış karakteristiklerini ve termal tabakalaşma performansını analiz etmeye yaradığını belirtmişlerdir [54].

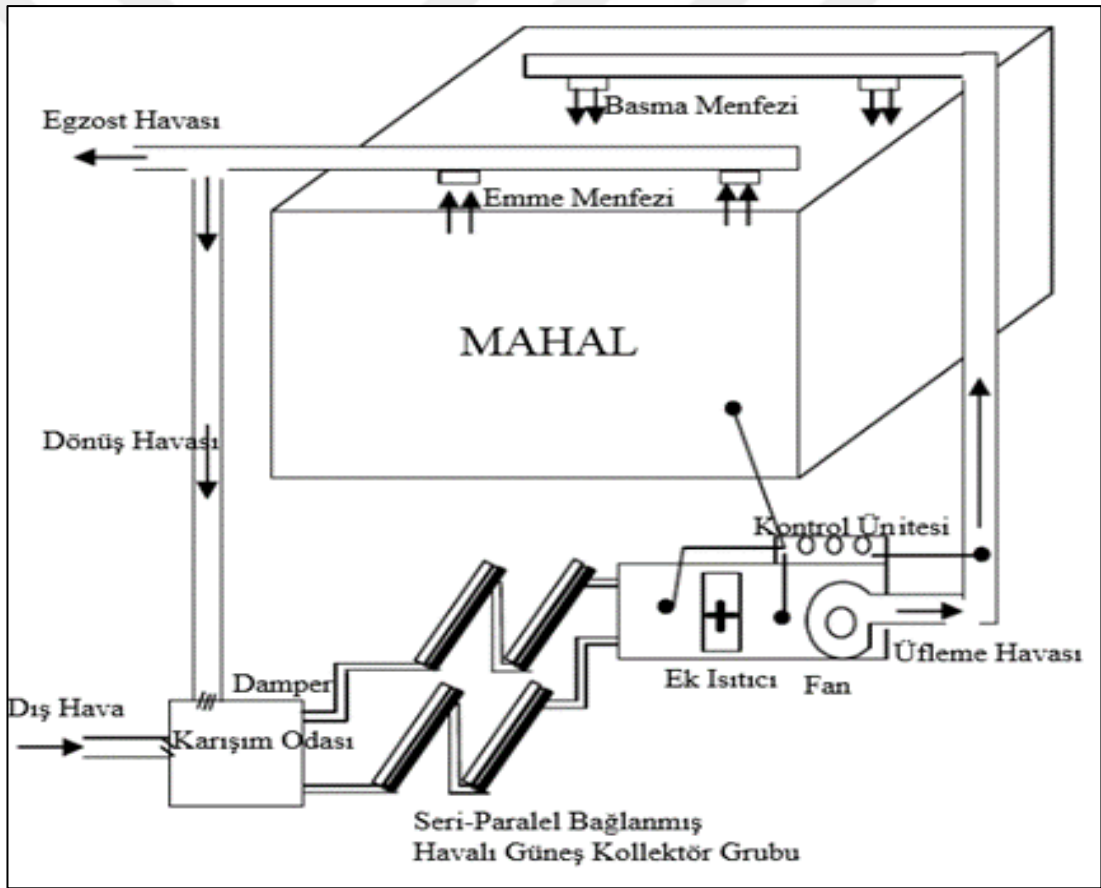
Virbhadra ve arkadaşları (2018), faz değiştiren madde ile desteklenen, balık kurutma aracı olarak bir güneş hava kurutucusunun kurmuş ve faz değiştiren maddenin balıkların ısı mevcudiyeti, ısı kullanımı ve kurutma kinetiği üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu nedenle, farklı erime noktalarına sahip iki farklı faz değiştiren maddenin karşılaştırmalı etkisini değerlendirmek için deneysel araştırmalar yapmışlardır. Faz değiştiren maddelerden birinin erime sıcaklığı nedeniyle balık kurutmaya uygun olmadığı tespit edilmiştir. Güneşli balık kurutucusunun çalışma sıcaklığının en iyi duruma getirilmesi için, optimum hava akış hızı, 5 m/s, kütleli debisi 0.314 kg/s olduğu belirlenmiştir. Balıkların kuruma süresinin yaklaşık %70 oranında azaldığı tespit edilmiştir [55].

Khaldi ve arkadaşları (2018), incirleri kurutmak için bir termal depo entegre edilmiş solar kurutucu üzerine çalışmışlardır. Çalışmada hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) ile dinamik ve termal davranışların analiz edilmesi amaçlanmış ve yapılan analiz sonuçlarına göre tasarım hakkında önerilerde bulunulmuştur [56].

3.3. Ülkemizde Yapılan Çalışmalar

Bulut ve Durmaz (2006), bir hava akışkanlı güneş kolektörünün (HAGK) tasarımını ve imalatını yaparak, performansını Şanlıurfa ilinin iklim şartlarına göre deneysel

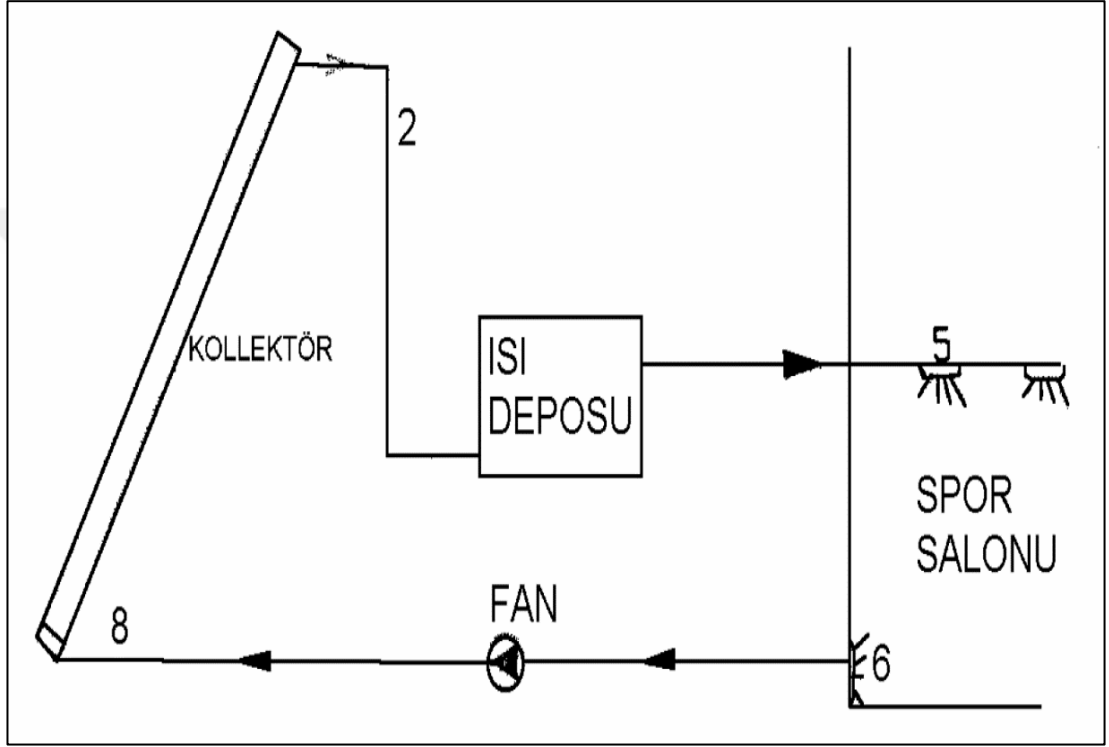
olarak analiz etmişlerdir. Kollektöre giriş-çıkışta havanın bağıl nemi ve sıcaklığı, bir sıcaklık/nem ölçerle, havanın hızı bir hız ölçerle, kollektör yüzeyine gelen güneş ışınımı bir pironometreyle, emici yüzeyin tabaka sıcaklığı ise bir temassız sıcaklık ölçerle ölçülmüştür. Hava akışkanlı güneş kollektörünün anlık ve ortalama ısıl verimi hesaplanmıştır. HAGK'nin ortalama ısıl verimi %53 olarak hesaplanmıştır. Kollektöre giriş- çıkış havası arasındaki ortalama sıcaklık farkı 20 °C olarak ölçülmüştür. Özellikle; güneşli, açık günlerde HAGK'nin havanın sıcaklığını önemli ölçüde yükselttiği görülmüştür. Yapılan deneyler sonucunda HAGK'nin, binaların (mekanların) ısıtılmasında kullanılabileceği görülmüş olup bu maksatla güneş enerjili bir dış hava karışımı ısıtma sistemi önerilmiştir (Şekil 3.5) [57].



Şekil 3.5. Bulut ve Durmaz tarafından önerilen dış hava karışımı HAGK'lü ısıtma sistemi [57]

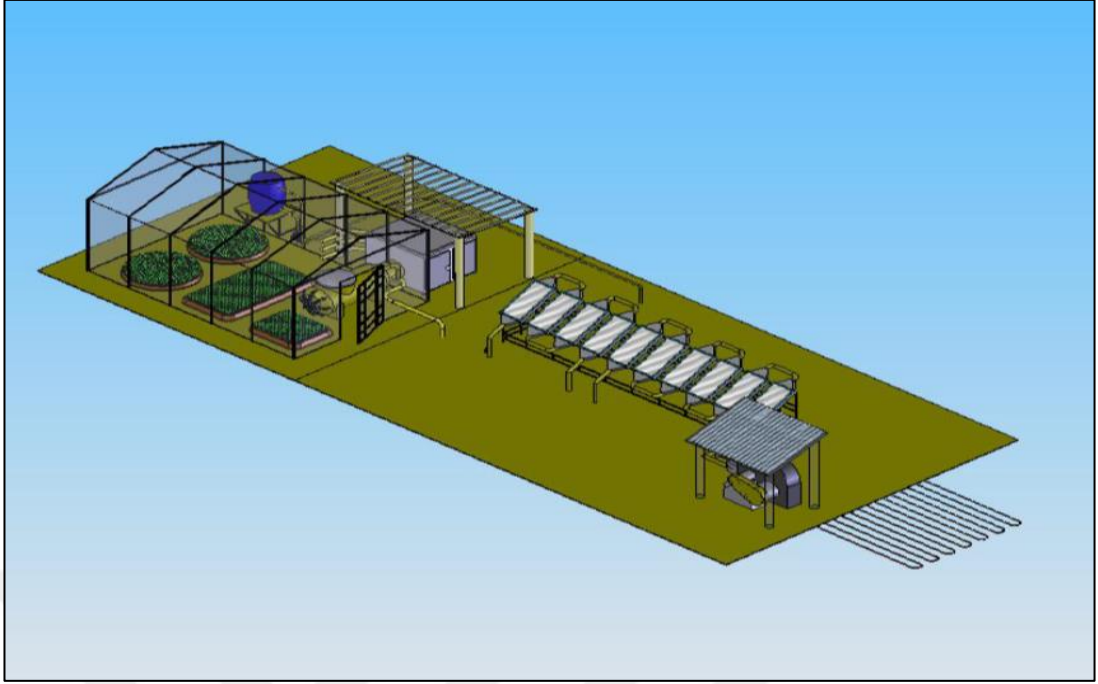
Koray Arda (2006) yaptığı tez çalışmasında, kapalı hacimlerin güneş enerjisi ile ısıtılması için yapılan çalışmalar doğrultusunda; Erciyes Üniversitesi kampüs alanı içerisinde yer alan Spor Salonunun ısıtma ihtiyacının güneş enerjisinden karşılanmasını amaçlamıştır. Sistemde içi su dolu pet şişelerden oluşan 2 adet ısı

deposu bulunmaktadır. Her bir sistemde hava, fan kullanılarak kollektör yüzeyini dolaşıp ısıtılmakta daha sonra ısı deposundan geçerek salona üflenmektedir (Şekil 3.6). Böylece hem ısı depolama hem de mekânın ısıtılması aynı anda yapılmaktadır. Çalışmada sonucunda termodinamiğin birinci kanuna göre ve ikinci kanuna göre salonun ısıtma ihtiyacını karşılama oranları aylara göre tespit edilmiş, ısı deposunun şarj ve deşarj süreleri tespit edilmiştir [14].



Şekil 3.6. Koray Arda'nın çalıştığı sistemin şematik görünümü [14]

Hüseyin Benli (2006) yaptığı tezde, Elazığ'da hava akışkanlı güneş kollektörleri (HAGK) ve toprak kaynaklı ısı pompası kullanılarak bir seranın ısıtılmasını deneysel olarak çalışmıştır. Deneysel çalışmada 10 adet HAGK, toprak kaynaklı ısı pompası, 30 m² alan ölçüsüne sahip cam sera ve gizli ısı depolama tankı kullanılmıştır (Şekil 3.7). Isı depolama tankı faz değiştiren maddeyle doldurulmuştur. Gizli ısı depolama tankı soğuk günler ve gecelerde deşarj edilerek enerjisiyle sera ısıtılmıştır. HAGK'lerinin yeterli olmadığı soğuk kış günlerinde deneylerde, toprak kaynaklı ısı pompası, sirkülasyon pompası, ölçüm ve diğer yardımcı ekipmanlar kullanılmıştır. Enerjiyi depolamak için gizli ısıyla enerji depolama yöntemi seçilmiş ve faz değiştiren madde olarak da düşük sıcaklıkta faz değiştiren Kalsiyum klorür hekza hidrat (CaCl₂.6H₂O) kullanılmıştır [58].

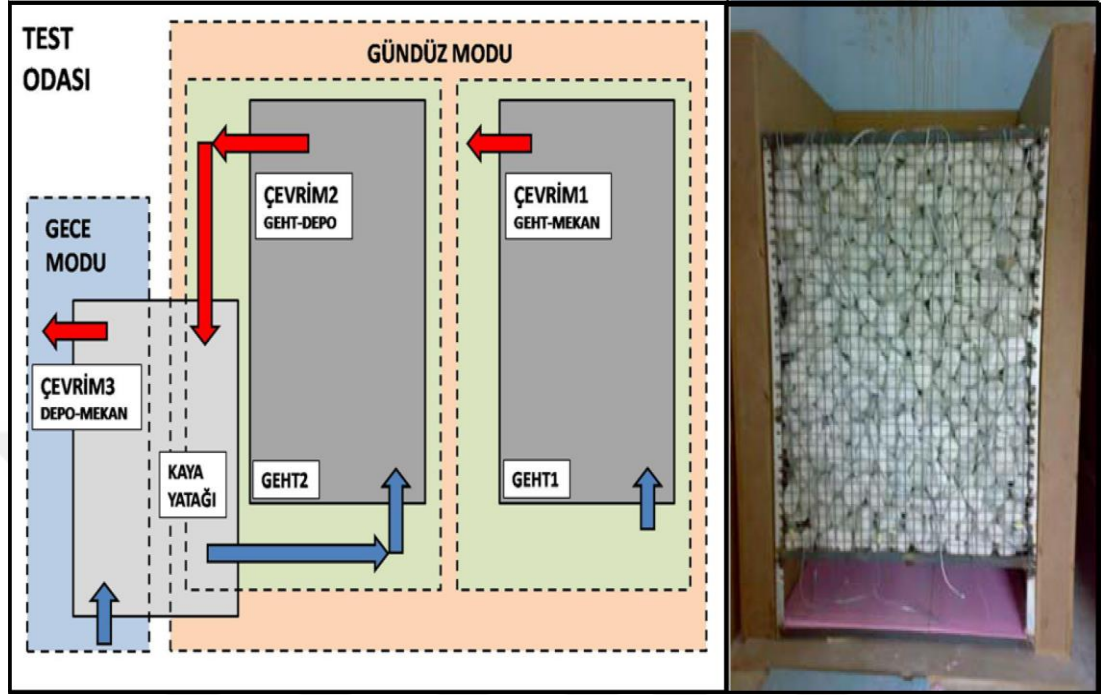


Şekil 3.7. Hüseyin Benli'nin sera ve ısıtma sistemini oluşturan ekipmanlarının görünümü [58]

Berrin KARAÇAVUŞ (2006) yapmış olduğu tez çalışmasında, Edirne iklim şartlarında, mekân ısıtması ve kullanma amaçlı sıcak su temini için güneş enerjisinin mevsimlik depolandığı bir ısıtma sistemini tasarlayarak kurmuş ve deneysel çalışmalar yapmıştır. Kollektör akışkanı olarak su kullanılmıştır. Isı depolamak için kullanılan su tankı toprak altına konulmuştur. Çalışmada enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır [59].

Ayşe İsmet ÇALIŞ (2009) yapmış olduğu tezde, taş/kaya yataklı güneş enerjisinin ısı olarak depolanması ve mekân ısıtmasında kullanılmasını amaçlamıştır. 2 adet hava akışkanlı güneş kollektörü (HAGK) ve ısı deposundan oluşan bir sistem tasarlanmış ve Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü'nde kurularak, performansı ölçülmüştür (Şekil 3.8). HAGK ve sistemin şarj-deşarj dönemleri için modeller oluşturulmuştur. Yapılan analizlerde, doğrudan kullanılan ve depolanan ısı enerjisi, güneş ışınımı değeri, dış sıcaklık değeri, rüzgâr ve ısıtma yüklerine bağlı olarak mekân içerisindeki sıcaklık değişimleri ve her iki toplayıcı, ısı deposu ve tüm sistem için enerji verimi tespit edilmiştir. Depolamada kullanılan zeolit yoğunluğunun belirlenmesi için yapılan deneysel analiz ve gölgeleme etkisinde olan güneş kollektörleri için gelen ışınım değerlerini hesaplama metodu sunulmuştur. Kurulan sistemin performansının test edilmesi maksadıyla şarj-deşarj süreçlerindeki; HAGK hava giriş-çıkış, ısı deposu içi,

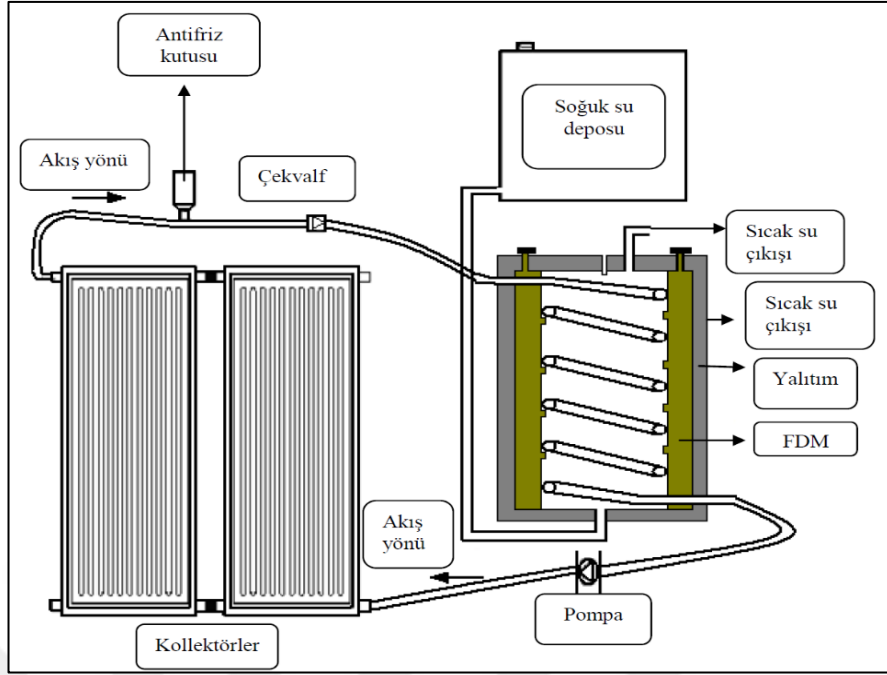
ısı deposu hava giriş-çıkış, dış ve iç mekânın sıcaklık değerleri, güneş ışınımı ve sistemdeki hava akış hızları tespit edilmiştir [26].



Şekil 3.8. Ayşe İsmet Çalış'ın sistem şeması ve ısı deposunun görüntüsü [26]

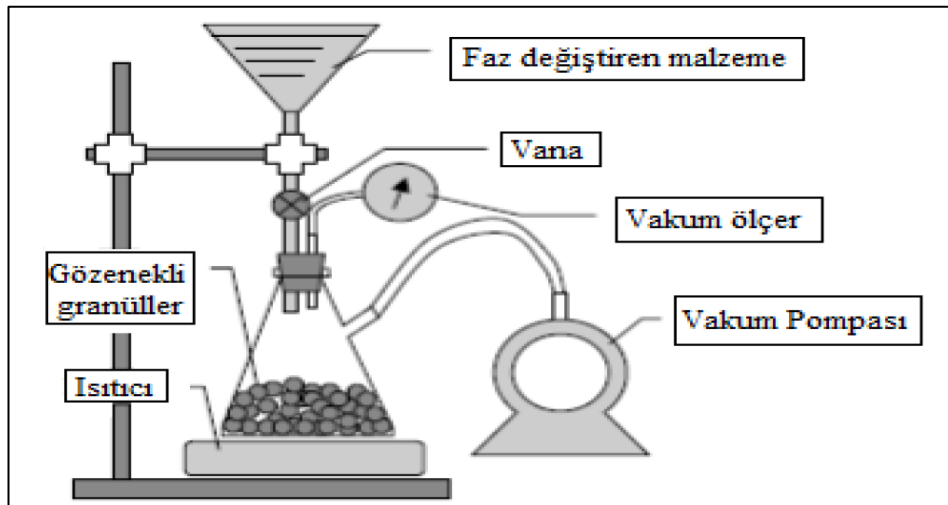
Fatih UĞUR (2010) yaptığı tez çalışmasında, havacılık ve endüstride yaygın olan hangar tipi yapıların güneş enerjisi ile ısıtılmasına yönelik bir hava akışkanlı güneş kollektörü (HAGK) geliştirilmesini amaçlamıştır. İlk olarak, mevcut güneş evleri ve ürün kurutma sistemlerinde kullanılan kollektörlerden faydalanarak bir ürün tasarlanmıştır. Bu ürünün hangarda uygulanması ile elde edilen bilgiler iki tip kollektör üzerinde karşılaştırmalı olarak denenmiştir. Bunun sonucunda elde edilen yeni bulgular yardımı ile hava kollektörü tasarımı geliştirilmiştir. Bu HAGK'nün kullanılması ile hangarların, ısıtma ihtiyacının yaklaşık %20'sinin güneş enerjisinden elde edeceği tespit edilmiştir [29].

Mert GÜRTÜRK (2011) yaptığı tezde, sıcak su tankında; sıcak su ve yalıtım malzemesi arasına faz değiştiren maddenin (FDM) konulacağı bir ısı deposu üzerinde çalışmıştır (Şekil 3.9). Bu depoya, iki farklı saf FDM'nin karıştırılması ile elde edilen bir FDM konulmuştur. Kurulan sistemin FDM'li ve FDM'siz olarak enerji, ekserji analizleri yapılmış bu analiz sonuçlarına göre, FDM'li deponun, FDM'siz depodan, daha fazla ısı depolayabildiğini göstermiştir [60].



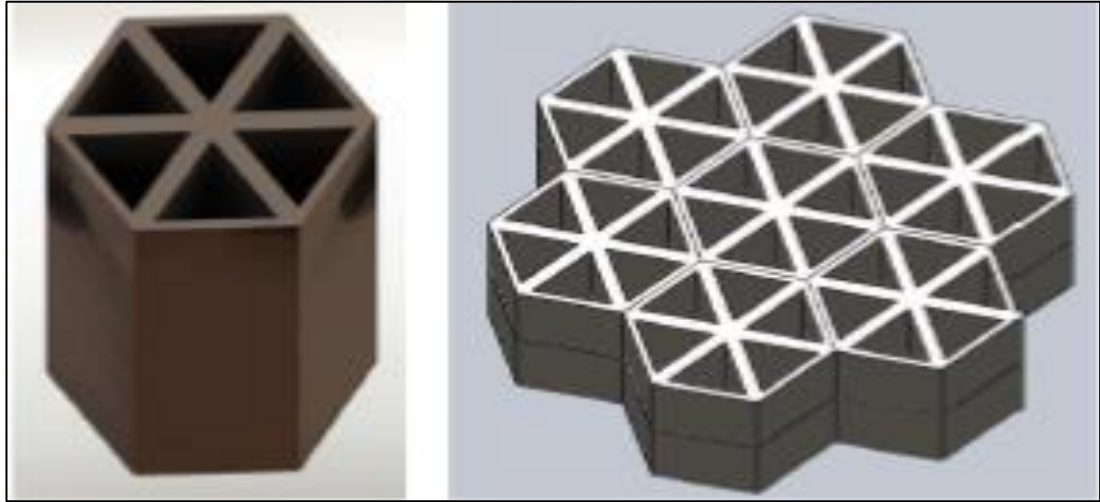
Şekil 3.9. Mert Gürtürk'ün deney düzeneğinin görüntüsü [60]

Okan ASLAN (2014) yaptığı tez çalışmasında, “vakum emdirme yöntemi” ile pomza ve zeolit gibi doğal malzemelere enerji depolanabilen yağ asidi, parafin ve parafin esaslı sentetik faz değıştiren maddelerin (FDM) belirli sıcaklıklarda emdirilmesini amaçlamıştır (Şekil 3.10). Birinci aşama olarak, farklı boyutlardaki granül pomza ve zeolit üzerine vakum etkisi altında ve farklı sıcaklıklarda FDM’ler emdirilmiştir. Pomza ve zeolitın faz değıştiren maddeleri tutma kapasiteleri tespit edilmiştir. İkinci aşama olarak, güneş enerjisinin ve binalardaki atık ısıların depolanabilme özellikleri ile ilgili elde edilen mikro kapsüllerin ısı depolama kapasiteleri belirlenmiştir [61].



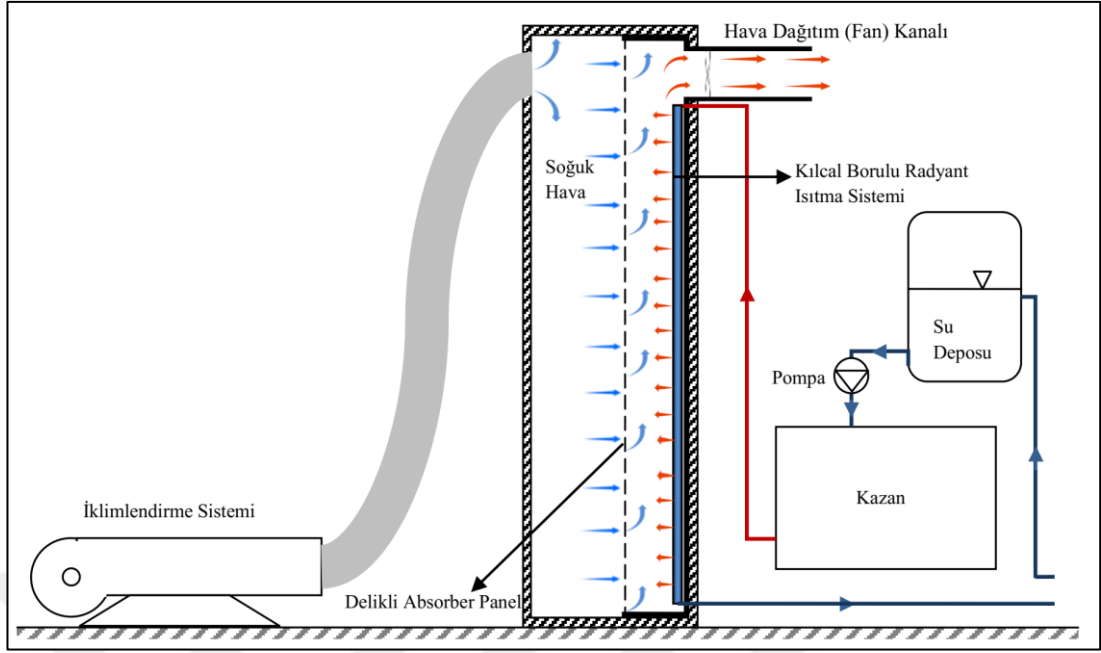
Şekil 3.10. Okan Aslan'ın vakum emdirme düzeneğinin görünümü [61]

Hakan ESGEL (2014) yaptığı tez çalışmasında, mevcut sistemlere alternatif olması maksadıyla seramik malzemenin depolama malzemesi ve havanın akışkan olarak kullanılacağı bir ısı depolama sistemi tasarlamıştır. Çalışmada, analizler Fluent Programı kullanılarak yapılmıştır. Seramik malzemenin özelliği, günümüzde sıklıkla kullanılan erimiş tuzların çalışma sıcaklıklarının çok daha üzerindeki sıcaklıklarda çalışabiliyor olmasıdır. Bu çalışmada seramik malzeme olarak kordiyerit seçilmiştir (Şekil 3.11). Kordiyerit esaslı seramik malzemenin yüksek sıcaklıklardaki ısı enerji depolama sistemleri için uygun bir malzeme olduğu belirtilmiştir. Yaklaşık 1650 K sıcaklığa kadar çıkabilen çalışma sıcaklığı ile, ergimiş tuz ve yağların duyulur ısı depolama uygulamalarına göre daha yüksek sıcaklıklara ulaşabildiği ifade edilmiştir. Ayrıca yüksek hacimsel ısı kapasiteye sahip olması nedeniyle kil, tuğla, beton, alüminyum, çakıl gibi duyulur ısı depolama ortamlarına göre de avantajlı olduğu vurgulanmıştır [15].



Şekil 3.11. Hakan Esgel'in çalışmış olduğu kordiyerit malzemenin altıgen şekilli tuğla [15]

Hacer AKHAN (2015) yapmış olduğu tez çalışmasında, hava akışkanlığı güneş kolektörü (HAGK) ve kılcal borulu ısıtma sistemi arasındaki ısı etkileşimi ve ısı transferi karakteristiklerini araştırmıştır (Şekil 3.12). Tez çalışmasında, kılcal borulu radyant ısıtma sistemiyle birleştirilmiş olan hava sızdırmalı güneş kolektörü için teorik ve deneysel analiz yapılmıştır. Kılcal borular ve güneş kolektörü arasındaki ısı transferi mekanizması, kolektör ve kılcal boru kütleli debileri, giriş sıcaklıkları gibi farklı parametreler için incelenmiştir. Enerji denge denklemlerine dayalı teorik analiz, yapılan deney sonuçları ile desteklenmiş ve sonlu elemanlar analizi yapılmıştır [62].



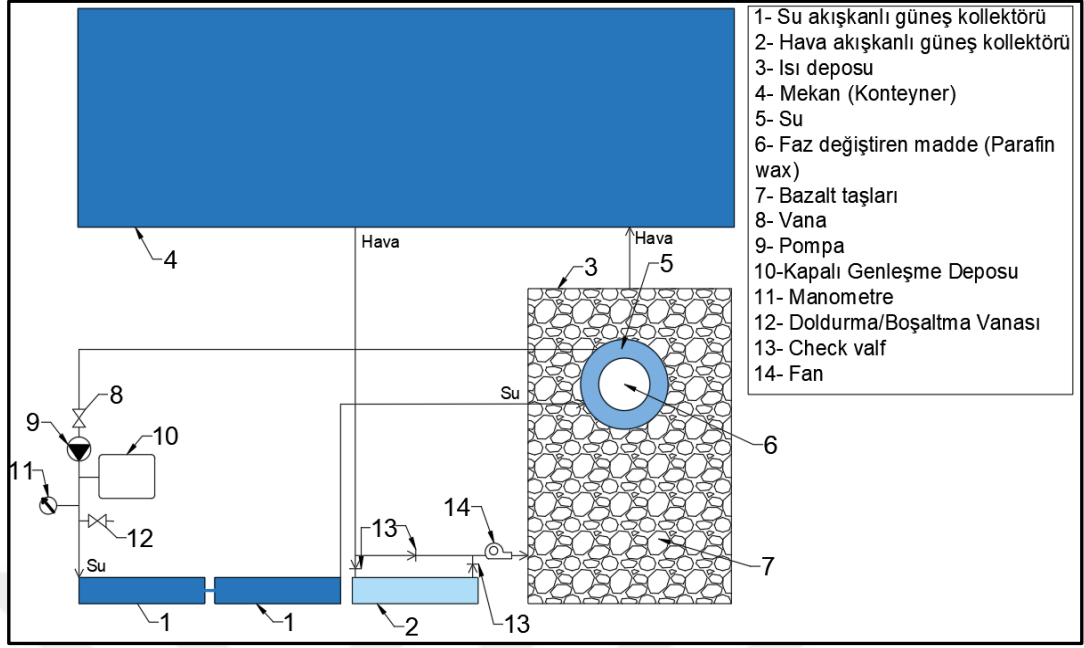
Şekil 3.12. Hacer Akhan'ın deney sisteminin şematik görünüşü [62]

4. ISI DEPOSUNUN TASARIMI VE DENEYSEL ÇALIŞMA YÖNTEMİ

Güneş enerjisinin verimli bir şekilde depolanabilmesi için literatürde bulunmayan yeni bir sistem tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiş, su ve taşlarda aynı anda ısı depolama yapılmıştır. Kollektörlerde elde edilen ısıнын ısı deposuna transferi için hem hava hem de su akışkanı kullanılmıştır. Ayrıca ısı deposunun güney cepheden direkt güneş ışınımı alması sağlanmıştır. Bunlara ek olarak faz değıştiren madde sisteme adapte edilmiş ve böylece duyulur ve gizli ısı depolama yöntemleri tek bir sistem içerisinde kullanılmıştır. Deneyler, 1400-1450 kWh/m²-yıl'lık güneş enerjisi potansiyeli ile güneşten istifade edilebilecek düzeydeki iller arasında olan Kocaeli ilinde Şubat, Mart ve Nisan aylarında yapılmıştır.

4.1. Deney Düzenegi

Çalışma için tasarlanan deney düzenegi Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Deneylerde aynı yöne bakacak şekilde yerleştirilmiş sandviç panelden imal edilmiş ve 3x4x2.6m boyutlarında iki adet eş konteyner kullanılmıştır. Sandviç paneller içerisinde yalıtım maksatlı 5 cm kalınlığında poliüretan köpük kullanılmıştır. Pencereleri 1x1 metre boyutlarında ve çift camlıdır. Kapıları 0,8x2 metre boyutundadır. Bu konteynerler birbirlerine gölge yapmayacak şekilde yerleştirilmişlerdir. Konteynerlerden birisi, deneyler boyunca tasarlanan ısı deposu tarafından ısıtılmış diğesinde ise herhangi bir sistem kullanılmamıştır. Ayrıca deney düzeneginde iki adet su akışkanlı güneş kollektörü (SAGK), bir adet hava akışkanlı güneş kollektörü (HAGK), bir adet fan, bir adet pompa, hava akışını kontrol etmek için üç adet kontrol valfi, su akışını kontrol etmek için iki adet vana kullanılmıştır.



Şekil 4.1. Deney sistemi ana elemanları şematik görünüm



Şekil 4.2. Deney sistemi ana elemanları

4.1.1. Isı deposunun tasarım ve imalatı

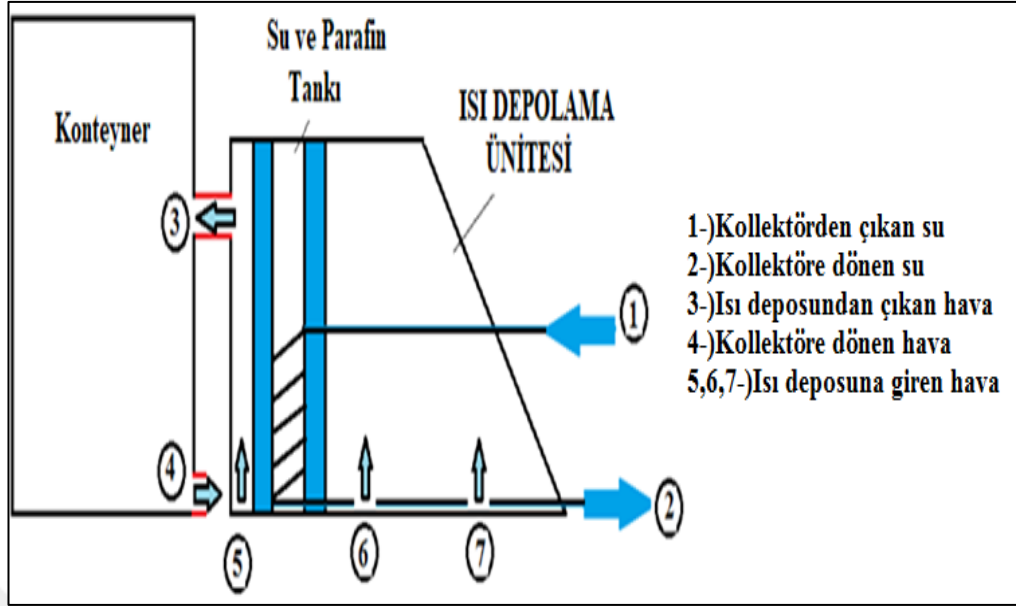
Isı deposu SAGK ve HAGK'den ısı aldığı gibi kendi güney cephesinden de güneş ışınımını alarak ısı enerjisine dönüştürecek ve güneşin olmadığı zamanlarda kullanılmak üzere ısıyı bazalt taşlarında, suda ve parafin waxta depolayacak şekilde tasarlanmıştır. Isı deposunun güney cephesi Kocaeli şartlarında en iyi verimi almak için 56 derece eğimli ve çift camlı olacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarlanıp imal edilen ısı deposu Şekil 4.3'te verilmiştir. Kontra plak malzemedan yapılan kabin

içerisine paslanmaz çelik malzemedan yapılmış silindirik tank (Şekil 4.5) yerleştirilmiştir.



Şekil 4.3. Isı deposu

Tank, Şekil 4.6’da görüldüğü gibi iç kısmına parafin wax, dış kısmına su konulacak şekilde iki bölmeli olarak imal edilmiştir. Tankın dış çapı 71,6 cm, yüksekliği 150 cm’dir. Parafin waxın depolandığı içteki tankın çapı ise 31.8 cm’dir. Bu tank SAGK tarafından devri daimi yapılan su tarafından ısıtılmaktadır. Tank içerisine güneş kollektöründen gelen ısıyı suya aktarmak üzere; 1 parmak (1") kalınlığında paslanmaz çelik fleks hortum, ısı değiştirici olarak helisel bir şekilde yerleştirilmiştir. Güneş kollektöründen gelen sıcak su Şekil 4.4’te görüldüğü gibi 1 no.lu okla gösterilen noktadan tanka girmektedir. Daha sonra tankta spiral şeklinde yerleştirilen fleks hortum içerisinde dolanarak ısısını tanka aktarmaktadır. En son deponun alt kısmından (2 numaralı okla gösterilen yer) depodan çıkarak güneş kollektörüne dönmektedir. Havanın, kabin içindeki taşlara dengeli şekilde ulaşabilmesi için kabinin alt kısmında 25 cm boşluk bırakılmış ve takozlar üzerine delikli sac yerleştirilmiştir. Delikli sacın altındaki boşluktan, kabinin arkasından (5 numaralı okla gösterilen yer), ortasından (6 numaralı okla gösterilen yer) ve önünden (7 numaralı okla gösterilen yer) olmak üzere 3 noktadan havanın sisteme gönderilmesine imkân sağlanmıştır.



Şekil 4.4. Isı deposu ve konteynerdeki akışkan hareketleri



Şekil 4.5. Isı deposu içerisinde bulunan tank, önden görünüş, taşlarla dolu ve boş hali

Isı deposun tüm birleşim yerleri hava sızdırmayacak şekilde silikonla kapatılmış ve 5 cm kalınlığında, ısı iletkenlik değeri $0,030 \leq \lambda \leq 0,035$ W/mK olan ekstrüde polistren (XPS) köpük ısı yalıtım malzemesi ile yalıtılmıştır.



Şekil 4.6. Isı deposu içinde bulunan tank, üstten görünüş

4.1.2. Su akışkanlı güneş kolektörleri

Deneylede Şekil 4.7’de verilmiş olan 2 adet aynı özelliklerde su akışkanlı güneş kolektörü kullanılmıştır. Kolektörler düzlemsel olup 1880x880x90 mm ölçülerindedir. Kolektörlere ait özellikler Tablo 4.1’de verilmiştir. Kolektör örtüsü olarak 4 mm temperli cam, yutucu plaka olarak 1,65 m² alüminyum siyah yüzey kullanılmıştır. Kolektör kasası alüminyum olup yalıtım malzemesi olarak taş yünü kullanılmıştır. Kolektöre alt noktadan giren su, pompanın etkisiyle siyah yüzey altındaki borular içinde dolaştırılmakta ve güneş ışınımı suyu ısıtarak ısı enerjisine dönüşmektedir. Isınan su kolektörün üst noktasından çıkarak, ısı deposu içerisindeki tanktan geçirilmekte ve enerjisini ısı deposunun içerisine taşımaktadır.

Tablo 4.1. Su akışkanlı güneş kolektörünün özellikleri

MODEL	Düzlemsel
ÖLÇÜLER	1880x880x90 mm
PANEL ÇERÇEVESİ	Alüminyum
CAM	4 mm Temperli
SU HACMİ	1,6 Litre
AĞIRLIK	40 Kg



Şekil 4.7. Su akışkanlı güneş kolektörü

4.1.3. Hava akışkanlı güneş kolektörü

Deney düzeneğinde kullanılan bir adet hava akışkanlı güneş kolektörü düzlemsel olup 1940x940x110 mm ölçülerindedir (Şekil 4.8). Kolektöre ait bazı özellikler Tablo 4.2’de yer almaktadır. Kolektör örtüsü olarak 4 mm temperli cam, yutucu plaka olarak 1,82 m² alüminyum siyah yüzey kullanılmıştır. Kolektör kasası alüminyum olup yalıtım malzemesi olarak taş yünü kullanılmıştır. Kolektöre alt noktadan giren hava, fan yardımıyla siyah yüzey altındaki kanalda dolaştırılmaktadır. Böylece güneş ışınımıyla ısınmış olan siyah yüzey havayla temas etmekte ve ısınıp havaya transfer etmektedir. Isınan hava kolektörün üst noktasından çıkarak, ısı deposundan geçirilmekte ve taşlarla temas etmektedir. Böylece ısı enerjisi ısı deposuna aktarılmış olmaktadır.

Tablo 4.2. Hava akışkanlı güneş kolektörünün özellikleri

MODEL	Solair SA-12
ÖLÇÜLER	1940x940x110 mm
SİYAH YÜZEY	Alüminyum
PANEL ÇERÇEVESİ	Eloksallı Alüminyum
CAM	4 mm Temperli
İZOLASYON	50 mm Taş yünü
ISITMA KAPASİTESİ	1200 W (Güneşli Açık Havada)
AĞIRLIK	45 Kg



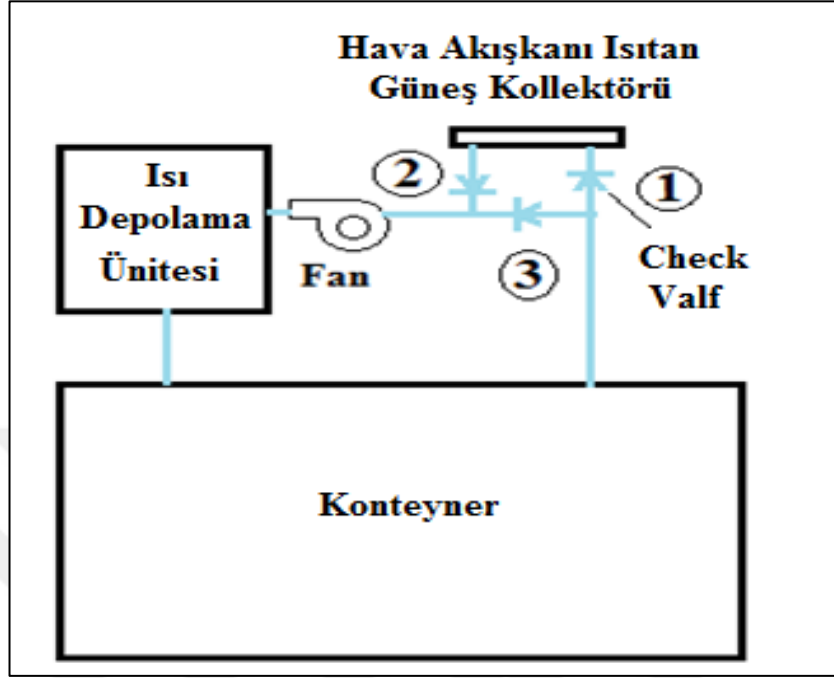
Şekil 4.8. Hava akışkanlı güneş kollektörü

4.1.4. Havalandırma ve su tesisatı

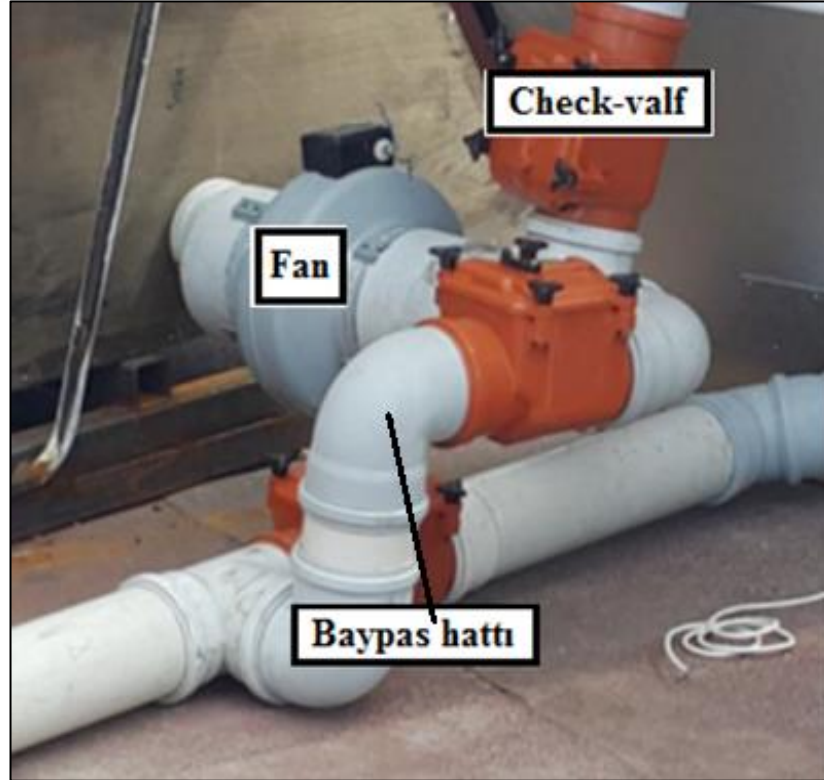
Isıtılacak havayı mekânın (konteynerin) tabanından alıp hava akışkanlı güneş kollektörüne taşıyacak şekilde PVC borudan bir hat çekilmiştir. Yine kollektörde ısınan havayı ısı deposuna taşımak üzere, PVC borularla, kollektörden ısı deposuna bağlantı yapılmıştır. Isı deposunun arka-üst kısmından da (Şekil 4.4'te 3 numaralı okla gösterilen yer) mekâna bağlantı yapılmıştır. Tüm havalandırma bağlantıları 125 mm çapında PVC borularla yapılmış ve borular elastomerik kauçuk esaslı malzeme ile yalıtılmıştır.

Havanın kontrolünü sağlamak, hava akışını kapayıp açmak üzere HAGK girişine ve çıkışına birer adet akışı tamamen kapatıp/açabilecek özellikte çek valf konulmuştur. Depolanan ısının güneşin olmadığı durumlarda, deşarj zamanında, odadan alınan hava kollektörden geçirilmeden direkt olarak ısı deposuna gönderilmektedir. Havayı direkt olarak ısı deposuna yönlendirebilmek maksadıyla kollektör girişine baypas hattı konulmuş yine bu hatta hava akışını tamamen açıp kapatabilecek özellikte çek valf konulmuştur (Şekil 4.9 ve Şekil 4.10). Güneşli ortamda ısı depolama yapılırken 3 numaralı check valf kapalı konumda diğerleri açıktır. Böylece, hava kollektörden geçip ısınarak ısı deposuna gönderilmektedir. Güneşin olmadığı durumda 1 ve 2

numaralı check valfler kapalı, 3 numaralı check valf açık konumdadır. Böylece hava direkt ısı deposuna gönderilmektedir.

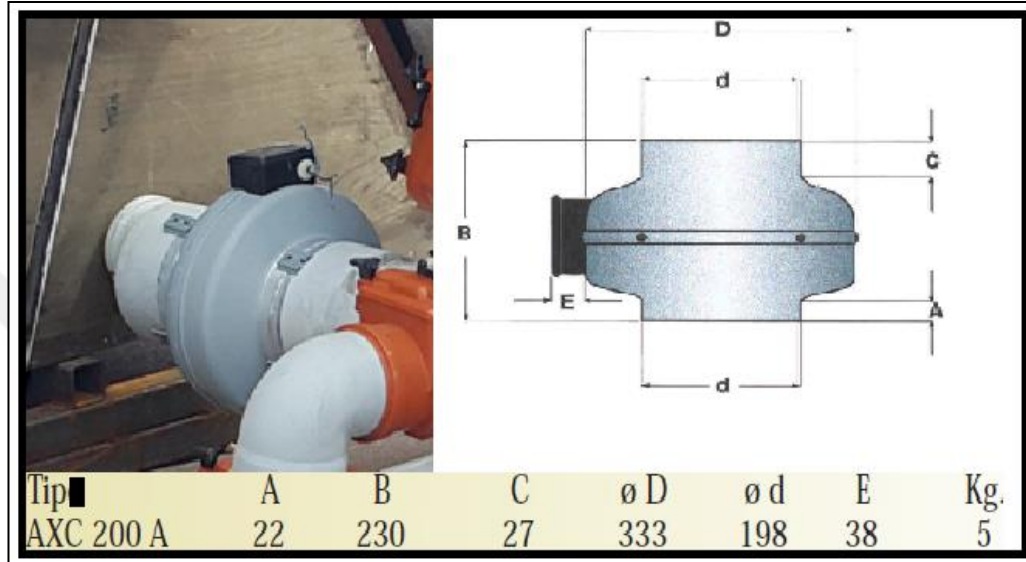


Şekil 4.9. Güneşle ısıtılan havanın sistemdeki dolaşımı



Şekil 4.10. Hava akışını açıp/kapatan check valfler

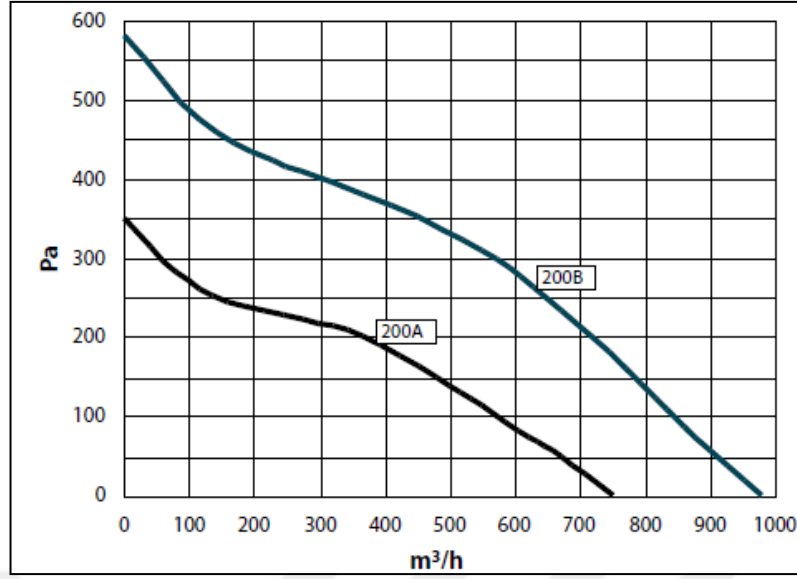
Havayı sistemde dolaştırmak üzere Elicent AXC 200 A model, kanal tipi, radyal fan kullanılmıştır (Şekil 4.11). Fan maksimum 800 m³/h debili, maksimum 370 Pa statik basınç özellikli ve 50 Watt gücündedir. Hava 5 m/s hızla (0,068 kg/s kütleli debiyle) ve kademe kademe azalan hızlarla (debilerle) ısı deposuna üflenmiştir. Fanın genel özellikleri Tablo 4.3'te, debi-statik basınç grafiği Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.11. Havalandırma tesisatında kullanılan kanal tipi fan [63]

Tablo 4.3 Tesisatta kullanılan fana ait özellikler

MODEL	Elicent AXC 200 A
TİP	Radyal, Kanal Tipi
DEBİ(maks)	800 m ³ /h
DEVİR	2450 d/d
STATİK BASINÇ(maks)	370 Pa
GÜÇ	50 Watt
SES SEVİYESİ	50 dB(A)
AKIM	0,4 A
FREKANS/VOLTAJ	50-60 Hz/ 230V
AĞIRLIK	5 Kg



Şekil 4.12. Fanın debi- statik basınç grafiği [63]

Su tesisatında SAGK'ler ile tankı ısıtan eşanjör 1 parmak polietilen su borularıyla birbirlerine bağlanmıştır. Isı eşanjörü olarak paslanmaz çelik fleks hortum kullanılmıştır. Fleks hortum küçük çaplı tanka spiral şekilde sarılmıştır. Güneş enerjisi sistemi kapalı devre ve zorlanmış sistem olarak dizayn edilmiştir. Suyu hareket vermek üzere bir adet pompa kullanılmıştır. Pompa 3 kademeli olup 1600, 2000 ve 2200 d/d hızlarında ve 0-4 m³/h debi aralığında çalışabilmektedir. Bu devirlerde sırayla 40, 60, 88 W motor gücünde çalışmaktadır. Pompa girişine paslanmaz çelik küresel vana konulmuştur. Pompa birinci kademedeki çalıştırılmıştır. Su tesisatına 1 adet yassı kapalı genişleme deposu, en üst noktaya sistemin havasını atmak üzere 1 adet otomatik hava atma pürjörü, sistemin su basıncını gösteren 1 adet mekanik manometre, 1 adet doldurma-boşaltma musluğu ve 1 adet vana takılmıştır. Su basıncı 1 bar olarak ayarlanmıştır.

4.2. Isı Depolamada Kullanılan Malzemeler

4.2.1. Bazalt taşı

Dünya üzerinde, ergimiş magmadan oluşmuş olan magmatik kayalar, en çok rastlanan kayaç çeşitleridir. Volkanik hareketler farklı türden kayalar ve lavlar meydana getirir. Kayalar, bir ya da birden fazla mineralin doğal olarak bir araya gelmesiyle oluşur. Bazı kayalar, örneğin mermer gibi sadece bir minerale sahiptir. Ancak kayaların çoğunluğu birden fazla mineral içermektedir. Mineraller doğal

olarak oluşmuş olup belirli bir kimyasal ve atomik yapıya sahip olan inorganik katılardır. Çok rastlanan kayaç türü olarak granit ve bazalt başta gelmektedir. Yerkabuğunun yaklaşık olarak %99'u sekiz elementten oluşur: oksijen, silisyum, alüminyum, demir, kalsiyum, sodyum, potasyum ve magnezyum. Sayılan elementlerin bir araya gelmesiyle doğal mineraller oluşur. Silikat mineralleri ve silis, kireçtaşı dışındaki çok rastlanan kayaç türlerinde yaygın olarak bulunmaktadır. Yerküremizin katı halde bulunan kısımlarının büyük bölümünü magmatik kayaçlar oluşturmaktadır [19].

Genel Bilgiler Bölümünde anlatıldığı üzere duyulur ısı depolamada en ideal ısı depolama özelliklerine sahip malzemeler arasında kayaçlar/taşlar da yer almaktadır. Kayaçlar/taşlar geniş yüzeyleri sayesinde hava akışkanı ile iyi ısı transferi sağlayan malzemeler olup havalı sistemler kullanımı en uygun malzemelerdendir. Çalışmamızda ısı depolama malzemesi olarak, ilimiz Kocaeli'nin Gölcük ilçesinin yaklaşık 20 km yukarısında bulunan bir taş ocağından (Şekil 4.13) temin edilen, bazalt taşı kullanılmıştır.



Şekil 4.13. Bazalt taşı çıkarılan işletmeden bir görüntü

Bazalt taşının kimyasal içeriğine ait analiz sonuçları Tablo 4.4'te verilmektedir. Kullanılan bazalt taşlarının özgül ağırlığı 2665 kg/m^3 tür. Isı deposu, kabin içerisi tankı saracak şekilde 4-6 cm boyutlarında 1250 kg bazalt taşı ile doldurulmuştur. Kabin içerisine iç içe iki silindirden oluşan tank yerleştirilmiştir.

Tablo 4.4. Çalışmamızda kullanılan bazalt taşının analiz sonuçları

Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	Ateş Zayıtı 1050 °C'de
3,8	2,1	17,6	56,9	0,2	1,9	7,0	0,9	0,1	8,2	1,25

Genel olarak bazalt taşlarının ısı iletim katsayısı 1,6 ile 1,9 W/(mK) aralığında verilmektedir [64].

4.2.2. Su ve parafin wax

Diğer ısı depolama malzemesi olarak ideal bir duyulur ısı depolama malzemesi olan, ucuz ve kolay temin edilebilen su kullanılmıştır. Çalışma sıcaklığı 100 °C'nin altında olan sistemlerde, yüksek ısı kapasitesi ve maliyetinin düşük olması sebebiyle ısı depolama malzemesi olarak su seçilmektedir. Isı deposu içerisindeki tankın su depolama hacmi 400 litredir. Küçük hacimde yüksek miktarda ısı depolayabilen faz değiştiren madde ile tankın ısı tutma kabiliyetinin artırılması hedeflendiği için diğer bir ısı depolama malzemesi olarak 50 litre parafin wax kullanılmıştır. Parafin wax ısı deposunun içinde yer alan ve iki bölmeden oluşan tankın ortasındaki bölmeye yerleştirilmiştir. Çalışmamızda kullanılan parafin waxın 46 °C'de eriyip/katılaştığı tespit edilmiştir. Parafinin gizli ısı kapasitesi 230-250 kJ/kg aralığında bulunmaktadır.

4.3. Kullanılan Cihazlar, Aletler

Deney düzeneklerinin kurulmasından sonra sistem çalıştırılmış ve güneş ışığı ölçümleri, sıcaklık ölçümleri, hava hızı ölçümü ve kullanılan elektrikli ısıtıcının çektiği gücün ve harcadığı enerjilerin ölçümleri yapılmıştır.

4.3.1. Piranometre ve veri kaydedicisi (datalogger)

Gelen güneş ışınımını ölçmek üzere EKO MS-410 Piranometre kullanılmış olup cihaz mekân üzerine 2 m yükseğe yerleştirilmiştir. Yapılan ölçümler Hioki LR 5041 datalogger'la kayıt altına alınmıştır

4.3.2. Sıcaklık ve nem veri toplayıcısı

Oda sıcaklıkları ve dış sıcaklıklar ile odaya üfleme sıcaklığı gibi değerler, sıcaklık ve nemi ölçerek kayıt altına alabilen CEM DT-172 cihazı ile ölçülüp kayıt altına alınmıştır. Oda sıcaklığı mekânın orta noktasından ölçülerek kaydedilmiştir. Dış sıcaklık mekânlar etrafında gölgede olacak şekilde ölçülmüştür.

4.3.3. Dört kanallı sıcaklık veri toplayıcı

Isı deposu ve tank sıcaklıkları CEM DT-8891 cihazı ile belli noktalardan ölçülüp kayıt altına alınmıştır. Isı deposu iki üst ve iki alt noktadan bazalt taşı sıcaklığı ölçülerek ortalaması alınmış ve ısı deposu sıcaklığı olarak nitelendirilmiştir. Su tankı tankın orta noktasından ölçülmüştür.

4.3.4. Teleskobik problu kızgın tel hava hızı ve sıcaklık ölçer

Sistemde dolaşan hava hızı CEM DT-8880 DT 8880 teleskobik problu kızgın tel hava hızı ve sıcaklık ölçer cihazıyla ölçülmüştür. Hava hızı HAGK'ne girişte ve ısı deposundan çıkışta ölçülmüştür.

4.3.5. Termal kamera

Isı deposunun belli noktalardan ve belli zamanlarda yüzey sıcaklıkları FLIR E45 termal kamera ile fotoğraflanarak kayıt altına alınmıştır. Termal kamera ile yapılan çekim Şekil 4.14'te görülen cepheden yapılmıştır.

4.3.6. Yağlı-dilimli radyatör

Deneyisel sistemde kullanılan her iki konteyner içinde mekanları istenen sıcaklığa ulaştırmak için, Arzum AR034 Minifin, 9 dilimli ve 2000 W gücünde elektrikle çalışan yağlı radyatör kullanılmıştır.

4.3.7. Oda termostatu

Oda sıcaklıklarını kontrol altına almak ve ısıtıcıları devreye alıp devreden çıkarmak üzere EMKO ESM 3710 oda termostatu kullanılmıştır.

4.3.8. Zaman ayarlı priz

Elektrikli aletleri (fan, pompa, radyatör gibi) belirli zaman aralıklarında çalıştırıp/durdurmak için zaman ayarlı priz kullanılmıştır.

4.3.9. Enerji ve akım kaydedici

Elektrikli aletlerin çektiği güç, harcadığı enerji ve çektiği akım Voltcraft Energy Logger 4000 ile gerekli zamanlarda ölçülüp kaydedilmiştir.

4.4. Yapılan Diğer Çalışmalar

Bu çalışmada tezin daha önceki bölümlerinde de anlatıldığı üzere tasarımı ve imalatı yapılan ısı deposunun performansını incelemek amacıyla birçok deney yapılmıştır. Tasarım aşamasında kademe kademe tüm sıcaklık değerleri hem ısı deposu için hem mekanlar için sürekli ölçülerek kaydedilmiştir. Hava akışkanlı güneş kolektörü ve su akışkanlı güneş kolektörü sıcaklıkları da sürekli ölçülerek kaydedilmiştir. Kolektörlerin ve ısı deposunun performansını ölçmeye yönelik ve mekanlar arası karşılaştırma deneyleri sıcaklık ve harcanan enerjiler ölçülmek suretiyle yapılmıştır. Tasarlanan ısı deposunda faz değiştiren madde kullanılmasının etkileri araştırılmıştır. Daha sonra ise güneş ışınımının direkt taşlara temasıyla ısı deposunun performansına etkisi incelenmiştir. Bu iki deneyin detayları aşağıda verilmektedir.

4.4.1. Isı deposunda faz değiştiren madde kullanılmasının etkisinin araştırıldığı deney

Bu deneyde, ısı deposunda faz değiştiren madde olan parafin wax kullanılmasının etkisi araştırılmıştır. Tankın orta bölmesi faz değiştiren madde için ayrılmıştır. Bu bölmeye parafin wax konularak, faz değiştiren malzemenin tankın ve ısı deposunun verimliği üzerindeki etkisi incelenmiştir. İlk önce parafin wax bölmesi boş bırakılarak tank içerisinde sadece su bulunduğunda tankın ve ısı deposunun sıcaklık değişimleri kaydedilmiştir. Daha sonra tankın orta bölmesine parafin wax doldurulmuş ve deneyler tekrarlanmıştır.

Ayrıca faz değiştiren madde kullanılan sistemle kullanmayan sistemin farklarını ortaya koyabilmek amacıyla mekânlar arası karşılaştırma deneyleri yapılmıştır. 22 Nisan

2016'da parafin wax kullanılmadan ve 30 Nisan 2016'da parafin wax kullanılarak deneyler yapılmıştır. İki gün de benzer şekilde gündüz açık ve güneşli olup piranometre ile ölçülen ışınım değerleri Bölüm 6'da, Şekil 6.7'de verilmiştir. Isı deposunda gün boyunca depolanan ısı enerjisi gece mekânlara fan yardımıyla üflenmiştir. Karşılaştırma yapılacak mekânlardan birincisi sadece elektrikli ısıtıcı ile ısıtılmış diğer mekân ise ilk başta termal ısı depolanan ısı deposuyla, ısı deposunun yetersiz kaldığı yerde de elektrikli ısıtıcı ile desteklenmiştir. İki mekânda da elektrikli ısıtıcıların harcadıkları enerjiler kaydedilmiştir. Her iki mekân da 20-20,5 °C sıcaklık aralığında tutulmak üzere termostatlar ayarlanmıştır.

4.4.2. Isı deposuna direkt güneş ışınımı etkisinin incelendiği deney

Bu deneyde bazalt taşlarının güney cepheden direkt güneş ışığı almasının ısı deposuna nasıl bir etki yapacağı araştırılmıştır. İlk başta deney sistemi klasik sistemlerde uygulandığı şekliyle tamamen etrafı kapalı olacak şekilde çalıştırılmıştır. Güneyde bulunan eğimli ve camlı olan cephe dıştan kapatılmış ve yalıtılmıştır. Sonrasında ise güney cephe açılarak camdan güneşin taşlara teması sağlanmıştır. Yine birinci deney kapsamında ısı deposunun Şekil 4.14'te görülen cephesinden bazalt taşlarının yüzey sıcaklıkları termal kamera kullanılarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.14. Isı deposunun termal kamera ile çekim yapılan yüzeyi

5. SİSTEMİN MATEMATİKSEL İFADESİ VE CFD İLE MODELLENMESİ

5.1. Taşlarda Akış

Tasarımı ve imalatı yapılan ısı deposu içerisine taşlar/kayaçlar yerleştirilmiştir. Hava akışkanlı güneş kollektöründe ısıtılan hava akışkanını taşlar/kayaçlar arasından geçirilerek ısı transfer edilmiştir. Yataklarda kullanılan taş çapı yaklaşık olarak 4-6 cm arasındadır. Böyle sistemler tasarlarken dikkate alınması gerekli en önemli faktörlerden bir tanesi yatak gözenekliliğidir. Gözenekliliğe bağlı hacim ifadesi Denklem (5.1)'de verilmiştir;

$$V = \frac{Q}{\rho C_p (1-\varepsilon) \Delta T} \quad (5.1)$$

Burada; (V) ısı deposunun hacmini, (Q) ısı enerjisi, (ρ) taşların yoğunluğunu, (C_p) taşların özgül ısısını, (ΔT) sıcaklık farkını, (ε) gözeneklilik oranını, ifade etmektedir.

Taş yatağındaki gözeneklilik oranının tespit edilmesi için, V hacminde bir kap önce içine konulan belli sayıdaki taş ile daha sonra da su doldurularak tartılmıştır ve aşağıdaki formül ile (Denklem (5.2)) gözeneklilik oranı bulunmuştur;

$$\varepsilon = \frac{m_s / \rho_s}{V_K} \quad (5.2)$$

Burada; (ε) gözeneklilik oranını, (m_s) su kütlesini, (ρ_s) su yoğunluğunu, (V_K) ölçü kabı hacmini ifade eder.

Gözenekli ortamlardaki akışla alakalı olarak literatürde karşılaşılan ilk çalışma Henry Philibert Gaspard Darcy'nin 1856 yılındaki Fransa'nın Dijon şehrine temiz su getirme projesi kapsamında yaptığı deneysel çalışmadır. Bu ilginç deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar gözenekli ortamlardaki akış problemlerine uygulanabilecek güncel bir matematik model haline getirilmiş ve günümüzde halen kullanılmaktadır [65].

Isı bilimlerinde kural olarak, bilinmekte olan denklemler taşınım ile ısı ve kütle geçişi olaylarını tanımlamaktadır. Bu tanımlama genel olarak mikroskobik boyuttadır [65].

Mikroskobik seviyedeki ısı ve akış problemlerinin çözümü ve tanımlanması gözenekli bir ortam için çoğu durumda ya imkansızdır veyahut da kullanışsızdır. Böyle durumlarda gözenekli ortam içerisinde taşınım denklemlerinin tanımlanabilmesi için makroskobik boyutta ele alınması gerekmektedir. Böylelikle sürekli, ölçülebilir ve değişken nicelikler belirlenebilecektir. Bununla birlikte sınır değer problemleri gözenekli ortam içerisinde açıklanabilir ve çözülebilir hale gelmektedir. Katı ve akışkan malzemelerden oluşmakta olan gözenekli ortam, sürekli ortam olarak kabul edilerek bir Temsili Temel Hacim (TTH) tanımı yapılır. TTH tüm gözenekli ortamın özelliğini temsil edecek boyutta seçilmelidir. TTH'nin boyutu tüm sistem boyutuna göre çok küçük ama gözenek boyutlarına göre de büyük olmalıdır. Böylelikle güvenli hacim ortalaması alınabilecek ve tüm ortam içinde her bir TTH, hız, yoğunluk, sıcaklık ve basınç gibi alan değişkenlerini temsil edebilecektir. Göz önüne alınan sürekli ortamlar için diferansiyel kütle, momentum ve enerji korunum denklemlerinin, yazılabilmeleri söz konusu alan değişkenlerinin ortalama değerlerinin tanımlanmasıyla mümkün olur [65].

Ölçülebilir olan en küçük hacim (TTH) ise, gözenekli ortamın ölçülebilir özellikleri de TTH kavramına dayandırılan sürekli ortam özellikleri olur. Böylelikle sürekli ortam veya makroskobik seviyedeki korunum denklemleri, mikroskobik seviyedeki korunum denklemlerinin alan ya da hacim ortalamaları alınarak bulunabilir [65].

5.1.1. Darcy yasası

Katı fazdaki maddelerin sıkıştırılmış parçacıkların ya da fitil liflerin yerleştirilmesi sonucu katı ve akışkandan oluşan ortam gözenekli ortam olarak adlandırılır. Gözenekli ortamlardaki akışın modellenmesi literatürde ilk olarak Henry Darcy tarafından 1856 yılında yapılan bir çalışma sonucunda ortaya konulmuştur. Yapılan bu çalışmada akışkan kum ile dolu olan silindirik borunun üst kısmından girmekte ve alt kısmından çıkmaktadır. Akışkanın girdiği üst kısım ile çıktığı alt kısım arasındaki basınç farkı ile akışkanın hızı arasında doğrusal bir ilişki olduğu tespit edilmiştir [66].

Darcy yasasına göre yapılmış bazı kabuller vardır. Bunlar akışkanın sıkıştırılmaz ve hızının yavaş oluşudur. Bunlarla birlikte Reynolds sayısının küçük olması, akışın tek yönlü olması, viskoz etkilerin yer almaması ve katı sınırlardaki sürtünme etkilerinin ihmal edilmesi yapılan diğer kabullerdir. Bu doğrusal ilişki günümüzde rafine edilmiş

olarak Denklem (5.3) ile ifade edilir [65];

$$v = - \frac{K}{\mu_f} (\nabla p_f + \rho g) \quad (5.3)$$

Denklem (5.3)'te (v), Darcy hızı, (∇p_f) ise akışkan kısmı içinde basınç değişim vektörüdür. (K) katsayısı, yöne göre özelliği değişmeyen gözenekli ortamın geçirgenliğini ifade etmektedir. (ρ) akışkanın öz kütlesi, (μ_f) ise akışkanın dinamik viskozitesidir.

5.1.2. Ergün denklemi

Literatürdeki ilk çalışma olan Darcy yasası, açıklanan kısıtlamalar için birçok araştırmacı tarafından geliştirilmiş ve böylelikle daha yüksek hıza sahip akışlarda akışın doğrusal olmayan etkisini modellemekte kullanılmıştır. Yapılan bu çalışmaların en önemlilerinden bir tanesi Sabri Ergün'ün 1952' de yapmış olduğu deneysel çalışmanın sonucunda elde ettiği denklemdir (Denklem (5.4)) [65].

$$-\frac{d(v)}{dx} + \rho_a g_x = \frac{\mu}{K} (v) + \rho_a C(v)^2 \quad (5.4)$$

Hazen-Dupit-Darcy denklemi olarak da bilinir. Ergün'ün yaptığı deneyde gözenekli ortam, küçük kürecikleri bulunduran bir akış kanalından oluşmaktadır. Denklemde sağ tarafında bulunan ilk terim viskoz sürüklenme kuvvetini, son terim ise şekil sürüklenme kuvvetini ifade etmektedir. Yine Denklem (5.5)'deki K gözenekli ortamın geçirgenliğini, Denklem (5.6)'daki $C = C_E / \sqrt{K}$ ise şekil sürüklenme katsayısını göstermektedir. Bu ifadeler deneysel olarak Ergün (1952) tarafından aşağıdaki gibi verilmiştir;

$$K = \frac{d_p^2 \varepsilon^3}{A(1-\varepsilon)^2} \quad (5.5)$$

$$C_E = \frac{B}{(150\varepsilon^3)^{1/2}} \quad (5.6)$$

Bu denklemlerde görülen A ve B deneysel sabitleri ifade etmekte olup $A=150$ ve $B=1,75$ olarak bulunmuştur. Denklemde görülen d_p ifadesi ise deneydeki gözenekli ortamı oluşturan küreciklerin çapını göstermektedir [65].

5.1.3. Forchheimer – Darcy denklemi

Darcy denklemi, Reynolds sayısının küçük olduğu durumlarda kullanılabilir. Reynolds sayısının büyük olduğu durumlar için basınç değişimi ve ortalama hız arasındaki denklem Darcy yasasının Forchheimer tarafından geliştirilmesi sonucunda aşağıdaki gibi bulunmuştur [66];

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\mu}{K} v + b\rho v^2 \quad (5.7)$$

Denklem (5.7)'de $b\rho v^2$ olarak gösterilen terim akışkan ataletinde oldukça önemli bir yere sahiptir. Üç boyutlu ortamlarda ve gövde kuvvetlerinin ihmal edilmediği durumlar için Forchheimer tarafından düzenlenen denklem aşağıdaki gibidir;

$$v + \frac{b\rho K}{\mu} |v|v = \frac{K}{\mu} (-\nabla p + \rho g) \quad (5.8)$$

Yapılan deneysel çalışmalar bu denklemin Reynolds sayısının büyük olduğu durumlar için geçerli olacağını ifade etmiştir. Forchheimer sabiti olarak gösterilen b asimptotik olarak $0.55 K^{-1/2}$ değerine gitmekte olup bu değer deneysel olarak bulunabilir [66].

5.1.4. Brinkman denklemi

Darcy yasasına göre ifade edilen denklemde viskoz difüzyonun etkisi bulunmamaktadır. Bu eksikliği gidermek amacıyla Brinkman 1947'de Darcy denklemini Denklem (5.9)'daki gibi düzenlemiştir [65];

$$-\nabla(P)_a + \rho_a g_x = \frac{\mu}{K} (v) - \mu_e \nabla^2 (v) \quad (5.9)$$

Bu denklemdeki (μ_e) , gözenekli ortamdaki akışkanın etkin viskozitesini ifade etmektedir. Değeri ise Bear ve Bachmat tarafından 1990'da Denklem (5.10)'da belirtildiği gibi önerilmiştir [66];

$$\mu_e = \frac{\mu}{\varepsilon} \lambda \quad (5.10)$$

Bu denklemde de görüldüğü üzere etkin viskozite gözeneklilikle alakalıdır. Brinkman denklemdeki son terim, akış içindeki viskoz kuvvetleri tanımlamaktadır. Darcy yaptığı çalışmada sınır etkisini dikkate alamaz iken, Brinkman denklemi ile bu eksiklik

gidermiştir. Bununla birlikte bu denklemde de atalet kuvvetlerinin dikkate alınmadığı görülmektedir [65].

Darcy Yasası için ifade edilen kısıtlamalar ve Ergün, Forchheimer ve Brinkman denklemleri, gözenekli bir ortam içinde akışı bütün akış hızları için modelleyememektedir. Gözenekli ortamda akışı bütün durumlar için modellemek için genel korunum denklemleri (kütle korunum denklemi, momentum denklemi, hacim ortalanmış enerji denklemleri) kullanılmaktadır [66].

5.2. Taşlarda Isı Depolamanın Matematiksel İfadesi

Enine ısı transferi, ışınım ile ısı transferi ve çevresel ısı kaybı olmadan, katı faz içerisinde sonsuz ısı iletimi olacak şekilde, termofiziksel özellikler sabit katı fazın sürekli bir ortam içerisinde bulunduğu varsayımıyla akışkan ve katı ortamın birlikte olduğu paket yatağın enerji dengesi şu şekilde ifade edilir:

$$\rho_f c_{p,f} \varepsilon \frac{\partial T_f}{\partial t} + G_f c_{p,f} \frac{\partial T_f}{\partial z} = h_v (T_s - T_f) + k_f \frac{\partial^2 T_f}{\partial z^2} \quad (5.11)$$

$$\rho_f c_s (1-\varepsilon) \frac{\partial T_s}{\partial t} = h_v (T_f - T_s) + k_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \quad (5.12)$$

Burada akışkan kütle akısı $G_f = \frac{\dot{m}_f}{A}$ olarak tanımlanır. Denklem (5.11) ve Denklem (5.12) yaygın olarak adlandırılan Sürekli-Katı Faz modelini oluşturur. Hem akışkan hem de katı fazlardaki ısı iletiminin göz ardı edilebileceği paketlenmiş yataklar için, daha basit olan Schumann modeline dönüşür. Schumann modeline göre yatak ve akışkan için diferansiyel denklemler (Denklem (5.13) ve Denklem (5.14)) aşağıdadır [67];

$$\rho_f c_{p,f} \varepsilon \frac{\partial T_f}{\partial t} = - \frac{\dot{m}_{p,f}}{A} \frac{\partial T_f}{\partial z} + h_v (T_s - T_f) \quad (5.13)$$

$$\rho_f c_s (1-\varepsilon) \frac{\partial T_s}{\partial t} = h_v (T_f - T_s) \quad (5.14)$$

Denklemlerdeki (h_v) yatakla akışkan arasındaki hacimsel ısı transferi katsayısını ifade etmektedir. Bu iki denklemin eş zamanlı olarak çözülebilmesi oldukça zordur. Hughes denklemi diferansiyel denklem şeklinde tek bir denklem olarak aşağıdaki şekilde belirtmiştir;

$$\frac{dT}{d\theta} = -L \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{(UA)_b}{(\dot{m}C_p)_f} (T_A - T) \quad (5.15)$$

NTU denklemi olarak da bilinen boyutsuz zaman ifadesine bağlı olarak bu iki Denklem (5.15)'de (T_A) çevre sıcaklığını, (θ) boyutsuz zamanı göstermektedir. Isı deposundan çevreye olan ısı kaybı da bu denklemde hesaba katılmaktadır. NTU değerine bağlı olarak bu denklem kullanılabilir. Aşağıda denklemi verilen NTU eğer 10'dan büyükse NTU modeli eğer 10'dan küçükse Schumann modelinin kullanılması gerekir [68];

$$NTU = \frac{h_v AL}{(\dot{m}C_p)_f} \quad (5.16)$$

Bir taş/kayaç yatağında ısı performansın önceden hesaplanabilmesi için birçok matematiksel modeller geliştirildiği görülmektedir. Bununla birlikte çoğu araştırmacı Mumma ve Marvin [69] tarafından geliştirilen matematiksel modeli kullanmışlardır.

Taş yatağından depolanan ısı enerjisi miktarı aşağıdaki genel eşitlik kullanılarak hesaplanabilir;

$$Q_t = \int_0^L (\rho C_p)_s (1-\varepsilon) A (T_{mm} - T_{mi}) dx \quad (5.17)$$

Bu denklemin çözümü sonlu farklar yöntemiyle;

$$Q_t = (\rho C_p)_s (1-\varepsilon) A \frac{L}{N} (\sum_{n=1}^N T_{mm} - NT_{bi}) \quad (5.18)$$

olarak ifade etmek mümkündür. Taş yatağı içerisindeki kullanılabilir enerji;

$$Q_a = \int_0^L (\rho C_p)_s (1-\varepsilon) A \left[(T_{mm} - T_{mi}) - T_{mi} \ln \left(\frac{T_{mm}}{T_{mi}} \right) \right] dx \quad (5.19)$$

genel ifadesiyle elde edilmiştir. Sonlu farklar yöntemiyle bu ifade çözümlerse aşağıdaki bağıntı elde edilir [70];

$$Q_a = (\rho C_p)_s (1-\varepsilon) A \frac{L}{N} \left[\frac{(\sum_{n=1}^N T_{mm} - NT_{bi}) - T_{bi}}{\ln \left(\frac{T_{1m} T_{2m} T_{3m} \dots T_{Nm}}{T_{bi}^N} \right)} \right] \quad (5.20)$$

5.3. Suda Isı Depolamanın Matematiksel İfadesi

Bir sıvının, sabit sıcaklıkta ve sonlu bir sıcaklık farkında depoladığı enerji;

$$Q_L = (mC_p)_L \cdot \Delta T_L \quad (5.21)$$

olarak belirtilebilir. (Q_L) ısı enerjisi, (m) kütleyi, (C_p) sabit basınçta özgül ısı ve (ΔT) ise sıcaklık farkını ifade etmektedir.

Isı depolama hacmi için enerji denkliği ifadesi;

$$(mC_p)_d \cdot \frac{dT_d}{dt} = Q_g - Q_\phi - (UA)_d(T_d - T_A) \quad (5.22)$$

(Q_g) kollektörden gelen enerjiyi, (Q_ϕ) ısı deposundan çıkan ısıyı göstermektedir. ($UA)_d(T_d - T_A)$ terimi ise çevreye olan ısı kaybını ifade etmektedir.

Belirli bir zaman aralığı için yukarıdaki ifade integre edilir ise;

$$T_d^+ = T_d + \frac{\Delta t}{(mC_p)_d} [Q_g - Q_\phi - (UA)_d(T_d - T_A)] \quad (5.23)$$

(T_d^+) belirli bir zaman sonra depo sıcaklığını göstermektedir. (T_d) ise belirli bir zaman aralığındaki başlangıç sıcaklığını ifade etmektedir [68].

5.4. Faz Değiştiren Maddelerde Isı Depolamanın Matematiksel İfadesi

Gizli ısı, maddelerin faz değişimi esnasında aldıkları veya verdikleri ısı enerjisidir. Isının depolanması katı-sıvı, katı-katı, sıvı-buhar ve buhar-katı dönüşümleri şeklinde olabilir. Bununla birlikte en fazla kullanılan katı-sıvı dönüşümdür [21]. Bu dönüşüm aşağıdaki denklemle ifade edilmiştir;

$$Q_p = (mC_p)_{PK} \cdot \Delta T_K + mh_{KS} + (mC_p)_{PS} \cdot \Delta T_S \quad (5.24)$$

(mh_{KS}) ile ifade edilen ortadaki terim gizli ısıyı, birinci terim katı halden eriyinceye kadar olan duyuşur ısıyı, son terim ise sıvı haldeyken sıcaklığın artışına bağlı olarak alınan duyuşur ısının miktarını göstermektedir [16].

5.5. Hava ve Su Akışkanlı Güneş Kollektöründe Elde Edilen Isının Matematiksel İfadesi

Kollektörler tarafından akışkana geçen ısı kollektörün alanına, güneşten gelen ışıının miktarına, akışkanın oranına ve çevre koşullarında bağlıdır.

Saydam örtünün ışıının geçirme oranı (τ) ve yutucu yüzeyin güneş ışıınınını yutma oranı (α) gelen güneş ışıınınının açısına ve kullanılan malzemenin özelliğine bağlıdır. Kollektörün toplam ısı geçiş katsayısı olan (U_L) ve sıcaklık farkı ($T_i - T_A$), bütün levhanın (T_i) sıcaklığında olduğu kabul edilerek kollektör levhasından olan ısı kaybını ifade etmektedir. Güneşten elde edilen gerçek kullanılabilir enerji değeri ile hesaplanan değer arasında oluşan fark ısı verimi katsayısı sayısını (F_R) ile giderilmektedir. (Q_U) anlık faydalı enerjiyi ifade etmektedir.

HAGK için yapılan çalışmada hava akış oranı Duffie ve Beckman [31] tarafından aşağıdaki bağıntılarla hesaplanmaktadır;

$$Q_U = A_C [I \cdot F_R \cdot (\tau \alpha) - F_R \cdot U_L \cdot (T_i - T_A)] \quad (5.25)$$

(Q_U) anlık faydalı enerji aynı zamanda aşağıdaki denklemle de hesaplanabilir;

$$Q_U = (m \cdot C_p)_a \cdot (T_C - T_G) \quad (5.26)$$

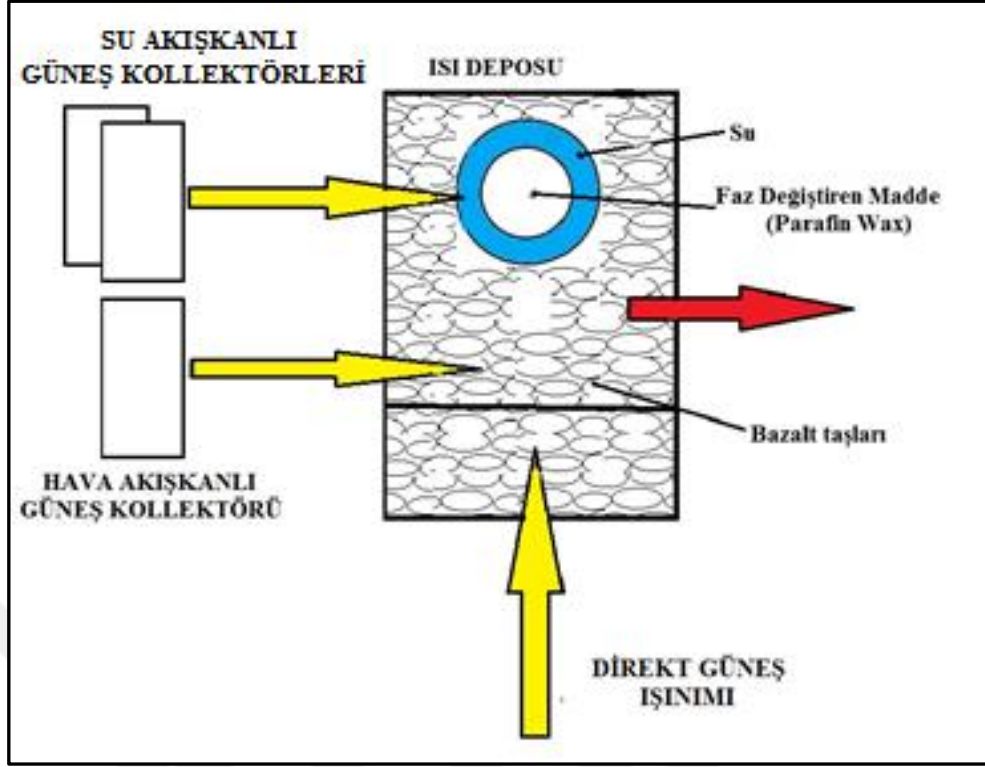
(T_C) ve (T_G) sırasıyla kollektörden çıkan ve kollektöre giren havanın sıcaklığıdır.

İki denklem birbirine eşitlenerek T_C şöyle ifade edilir;

$$T_C = \frac{A_C [I \cdot F_R \cdot (\tau \alpha) - F_R \cdot U_L \cdot (T_i - T_A)]}{C_{p_a} \cdot m_a} + T_G \quad (5.27)$$

5.6. Isı Deposunda Depolanan Toplam Isının Matematiksel İfadesi

Güneş enerjisi elektromanyetik formdan ısı ya da elektriğe dönüştürülerek depolanabilmektedir. Sistemimiz iki adet su akışkanlı güneş kollektörü ile bir adet HAGK'den, bunlar vasıtasıyla elde edilen ısı enerjinin depolandığı ısı deposundan ve ısıtılacak mekân olarak kullanılan konteynerdan oluşmaktadır.



Şekil 5.1. Isı deposunun şematik görünümü

Su akışkanlı güneş kollektörü güneşten aldığı enerjiyi ısı deposu içinde bulunan tanka taşımaktadır. Tankın orta bölümünde faz değıştiren madde olan parafin wax, onun etrafında ise su bulunmaktadır. Isı deposu bazalt taşları ile doludur ve hava akışkanlı güneş kollektörü güneşten aldığı ısıyla taşları ısıtmaktadır. Ayrıca güney cephesi 56 derece eğimli ve cam yüzeyden oluşan ısı deposu direkt güneş ışınımı ile de ısınmaktadır.

Genel olarak Şekil 5.1'deki ısı deposunun enerji dengesini aşağıdaki eşitlik şeklinde yazabiliriz:

$$\text{Verilen ısı enerjisi} = \text{Depolanan enerji} + \text{Kayıp enerji} \quad (5.28)$$

Isı deposunda enerji girişı hava ve su akışkanlı güneş kollektörlerince ayrıca güney cepheden direkt güneş ışınımı ile sağlanmaktadır. Isı deposunda ısı enerjisi; suda, faz değıştiren madde olan parafin waxta ve bazalt taşlarında depolanmaktadır.

Suda depolanan enerji;

$$Q_{SU} = (mC_p)_{SU} \cdot \Delta T_{SU} \quad (5.29)$$

$$Q_{SU}=(mC_p)_{SU} \cdot (T_2-T_1)_{SU} \quad (5.30)$$

Parafin waxta depolanan enerji;

$$Q_P=(mC_p)_{PK} \cdot \Delta T_K + mh_{KS} + (mC_p)_{PS} \cdot \Delta T_S \quad (5.31)$$

$$Q_P=(mC_p)_{PK} \cdot (T_e-T_1) + mh_{KS} + (mC_p)_{PS} \cdot (T_2-T_e) \quad (5.32)$$

Bazalt taşlarında depolanan enerji;

$$Q_B=(mC_p)_B \cdot \Delta T_B \quad (5.33)$$

$$Q_B=(mC_p)_B \cdot (T_2-T_1)_B \quad (5.34)$$

(Q) ısı enerjisi, (m) kütleyi, (C_p) sabit basınçta özgül ısıyı ve (ΔT) ise sıcaklık farkını ifade etmektedir. Isı deposunda depolanan toplam ısı enerjisi aşağıdaki bağıntıyla elde edilir:

$$Q_{Isı\ Deposu} = Q_{SU} + Q_P + Q_B \quad (5.35)$$

Bu bağıntı daha açık olarak yazılırsa;

$$Q_{Isı\ Deposu} = (mC_p)_{SU} \cdot (T_2-T_1)_{SU} + (mC_p)_{PK} \cdot (T_e-T_1) + mh_{KS} + (mC_p)_{PS} \cdot (T_2-T_e) + (mC_p)_B \cdot (T_2-T_1)_B \quad (5.36)$$

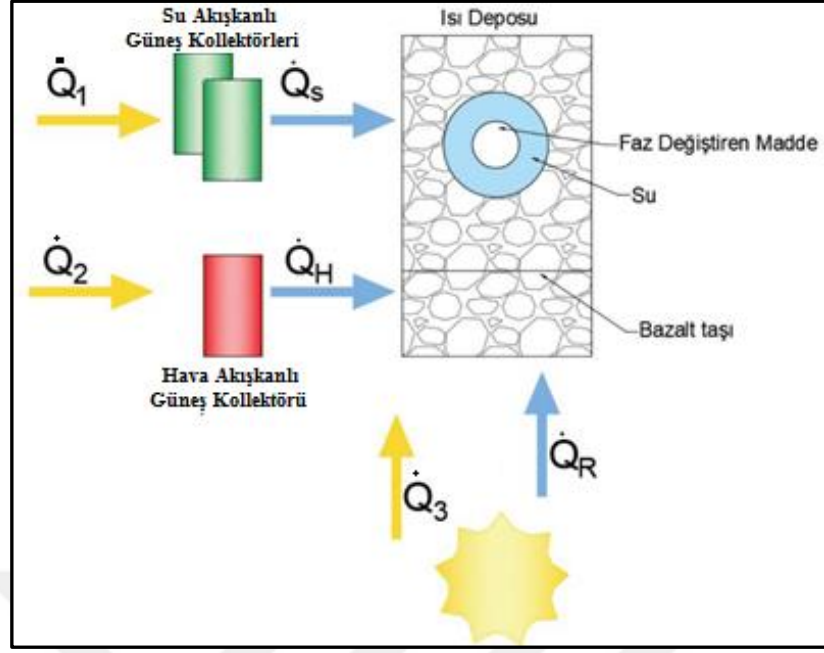
denklemlerle ifade edilir.

5.7. Isı Deposuna Aktarılan Isıl Güçler ve Direkt Güneş Işınımı Etkisi

Güneşten kollektör yüzeylerine gelen ısı güçleri (\dot{Q}_1), (\dot{Q}_2) ve ısı deposu güney cephesine gelen ısı güç (\dot{Q}_3) olmak üzere, yüzeylere gelen toplam ısı güç (\dot{Q}_{Top});

$$\dot{Q}_{Top} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 \quad (5.37)$$

denklemlerle ifade edilir. Isı deposuna aktarılan ısı güçleri Şekil 5.2’de verilmektedir.



Şekil 5.2 Isı deposuna transfer edilen ısı güçleri

Isı deposuna su akışkanlı güneş kolektörüyle su gönderilerek, hava akışkanlı güneş kolektörüyle hava gönderilerek ve güney cepheden cam örtüden geçerek bazalt taşlarına direkt güneş ışınımı ile ısı transferi sağlanmaktadır. Isı deposuna sağlanan ısı güçleri ifade edilecek olursa (\dot{Q}_S) SAGK'nden ısı deposuna transfer edilen ısı güç, (\dot{Q}_H) HAGK'nden ısı deposuna transfer edilen ısı güç ve (\dot{Q}_R) güneşten direkt bazalt taşlarına gelip bazalt taşlarından ışınlım yoluyla ısı deposuna transfer edilen ısı güçtür. Isı deposuna sağlanan toplam ısı güç (\dot{Q}_{IT}) olmak üzere;

$$\dot{Q}_{IT} = \dot{Q}_S + \dot{Q}_H + \dot{Q}_R \quad (5.38)$$

denklemleri ile ifade edilir. Isı deposunun direkt güneş alan yüzeyi ve kolektörler Kocaeli ili kış şartlarına uygun olacak şekilde 56 derece eğimli ve güney doğru yerleştirilmiştir. Su ve hava akışkanının ısı deposuna sağladığı ısı güç (\dot{Q}_S) ve (\dot{Q}_H);

$$\dot{Q}_S = (\dot{m}C_p)_{SU} \cdot (T_2 - T_1)_{SU} \quad (5.39)$$

$$\dot{Q}_H = (\dot{m}C_p)_{Hava} \cdot (T_2 - T_1)_{Hava} \quad (5.40)$$

ışınlımla olan zamana bağlı ısı transferi ise;

$$\dot{Q}_R = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_Y \cdot (T_S^4 - T_A^4) \quad (5.41)$$

Denklemdaki (ε) yayıcılık katsayısını, (σ) Stefan-Boltzmann sabitini [$\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ W/(m² K⁴)], (T_S) yüzey sıcaklığını ve (T_A) çevre sıcaklığını ifade etmektedir.

SAGK yüzey alanı 1,65 m²'dir. İki adet kullanıldığından ısı deposuna su akışkanı ısıtılan toplam kollektör alanı 3,30 m²'dir. HAGK bir adet kullanılmış olup hava akışkanı ısıtılan toplam kollektör alanı 1,82 m²'dir. Direkt güneş ışınımıyla bazalt taşlarının ısıtıldığı yüzey alanı ise $A_Y = 2,16$ m²'dir. Bazalt taşı için literatürdeki değerler göz önüne alınarak ε yayıcılık değeri 0,72 olarak kabul edilmiştir.

Saat 13:00 için yapılan hesaplamalar sonucunda; ısı deposuna direkt güneş ışınımının sağladığı güç; (\dot{Q}_R) değerinin (\dot{Q}_{IT}) değerine oranlanmasıyla bulunmuştur. Toplam ısı deposu gücünün %12,3'ü direkt ışınım yoluyla sağlanmaktadır. Yine aynı şekilde (\dot{Q}_S) ve (\dot{Q}_H) değerlerinin (\dot{Q}_{IT}) değerine oranlanmasıyla ısı deposu gücünün %27,4'ünün SAGK tarafından, %60,3'ünün de HAGK tarafından sağlandığı tespit edilmiştir.

5.8. Sistemin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD/CFD) ile Modellenmesi ve Analizi

5.8.1. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği

Hesaplamalı akışkanlar mekaniği HAD olarak kısaltılmakta olup İngilizce kısaltması olan CFD (Computational Fluid Dynamics) yaygın olarak kullanılmaktadır. İncelenen sisteme ait karmaşık problemler Gauss eliminasyonu, Cramer, sonlu farklar, sonlu elemanlar ya da sonlu hacimler gibi yöntemler kullanılarak modellenir ve analiz edilir.

HAD analizlerinin sonuçları yeni tasarımlar yapma, detaylı olarak ürün geliştirme, çözüm geliştirme ve tekrar tasarlama gibi mühendislik çözümlerle alakalıdır [71].

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin temelini, Navier-Stokes denklemleri olarak bilinen kütle korunumu (süreklilik), momentum korunumu ve enerjinin korunumu denklemleri oluşturmaktadır. HAD, incelenmek istenen sistem içerisinde oluşturulmuş olan sayısal çözüm ağı üzerinde, Navier-Stokes denklemlerinin çözülmesi esasına dayanmaktadır [72].

Akışkanlar mekaniği incelemelerinde akışların fiziksel durumunu ifade eden matematiksel denklemler mevcuttur. Bu matematiksel denklemler diferansiyel denklemler şeklinde olup karmaşık akış yapılarının tam olarak ortaya koyar. Bununla birlikte bu diferansiyel denklemlerin analitik çözümleri oldukça zor olduğundan bazı terimler ihmal edilerek çözülebilmektedir. Sayısal metotların ve bilgisayarların gelişmesiyle günümüzde artık sayısal olarak da çözüm üretmek mümkün hale gelmiştir [73].

5.8.2. Temel denklemler

Sistem olarak ele alınan hacimde tanımlanan problemlerin akış ve ısı transferi davranışlarının sayısal olarak incelenebilmesi için, HAD 'nin temel denklemlerinin uygun şekilde kabul edilen sınır şartlarına göre çözülmesi gerekmektedir. Bu temel denklemler kütle korunumu (süreklilik), momentum korunumu ve enerji korunumu kanunlarından türetilmiş olup genelde Navier-Stokes denklemleri olarak adlandırılmaktadır. Momentum korunumu Newton'un ikinci yasası ve enerji korunumu termodinamiğin birinci yasası olarak da bilinmektedir.

5.8.2.1. Kütlenin korunumu denklemi

Süreklilik denklemi olarak da ifade edilen denklem, kontrol hacmi içindeki kütlenin zamana bağlı olarak değişim hızı ile kontrol yüzeyinden olan net kütle geçişinin toplamının sıfıra eşit olduğunu ifade etmektedir. Bu ifade Denklem (5.42)'de görülmektedir;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (5.42)$$

Denklemdaki ifadelerden; (ρ) akışkanın yoğunluğunu, (t) zamanı, (\vec{v}) hız vektörünü temsil etmektedir. Hız vektörünün diverjansını açık bir şekilde yazdığımızda Denklem (5.43) elde edilir;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (5.43)$$

Denklemden; (ρ) akışkanın yoğunluğunu, (t) zamanı, (\vec{v}) hız vektörünü, (u) , (v) ve (w) sırasıyla x , y ve z yönlerindeki hız bileşenlerini ifade etmek için kullanılan sembollerdir [73].

5.8.2.2. Momentumun korunumu denklemi

Newton'un İkinci Kanunu'ndan elde edilen momentumun korunumu denklemi, bir sisteme etkiyen dış kuvvetler toplamının sistemin momentumunun birim zamanda değişimine eşitliğini ifade etmektedir. Bu eşitlik Denklem (5.44)'de görüldüğü gibidir [73];

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \quad (5.44)$$

5.8.2.3. Enerjinin korunumu denklemi

Termodinamiğin birinci kanunundan türetilen enerji denklemi ele alınan sistemde toplam enerjinin sisteme giren ve sistemden çıkan net ısı ile sistemde tüketilen ve sistemde üretilen net işin toplamına eşit olmasını ifade eder. Bu ifade Denklem (5.45)'te verilmiştir [73];

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [u_j (\rho E + P)] = - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} + \frac{\partial (u_j \sigma_{ji})}{\partial x_j} \quad (5.45)$$

Hesaplı akışkanlar dinamiği için yapılacak çözümlelerde genel olarak aşağıdaki sırayla yapılmaktadır [74];

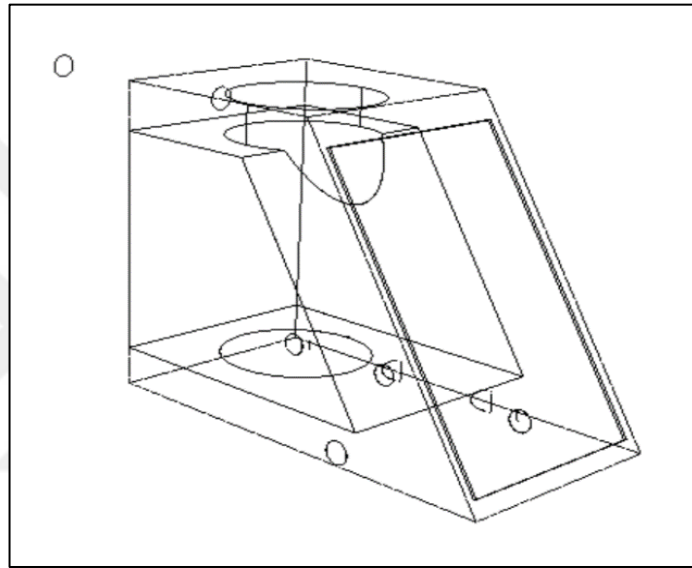
- Sistemin CAD geometrisinin oluşturulması,
- Çözüm alanına uygun olacak şekilde çözüm ağının oluşturulması,
- Çözümlenecek problemin fiziksel şartları, başlangıç ve sınır şartlarının belirlenmesi,
- Bilgisayar destekli olarak çözümün yapılması,
- Çözümün görselleştirilerek sunulması ve yorumlanması.

Çalışmamızda sistem içerisinde yer alan ısı deposu hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile yukarıda sırayla modellenerek analiz edilmiştir.

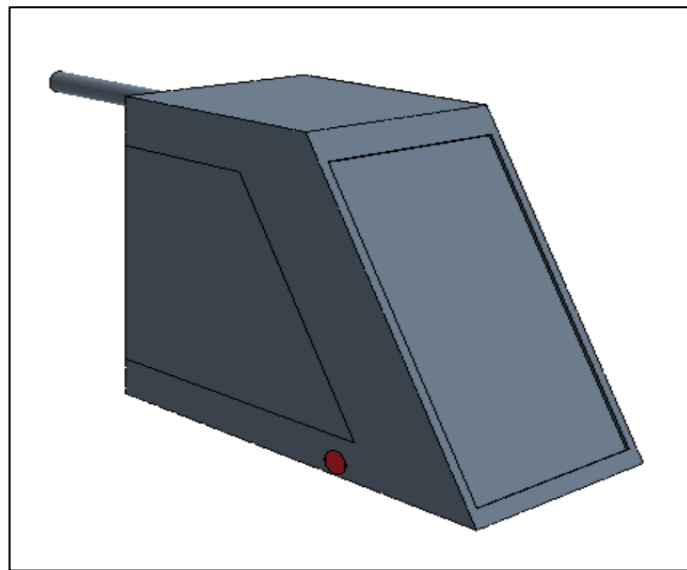
5.8.3. Üç boyutlu geometrik modelin oluşturulması

Analizi yapılacak olan ısı deposu ana boyutları belirlendikten sonra bu formlar için yüzey oluşturulması kısmına geçilmiştir. Isı deposunun dış kabin kısmı kontra plak malzemeden yapılmıştır. Kabinin alt boy uzunluğu 220 cm, üst boy uzunluğu 130 cm'dir. Eni 130 cm, yüksekliği 170 cm'dir. Güney cephe 56 derece eğimli olarak imal

edilmiş ve modellenmiştir. Kabin içerisine paslanmaz çelik malzemeden yapılmış silindirik tank yerleştirilmiştir. Tank, iç kısmına parafin wax, dış kısmına su konulacak şekilde iki bölmeli olarak imal edilmiştir. Tankın dış çapı 71,6 cm yüksekliği 150 cm'dir. Parafin waxın depolandığı içteki tankın çapı 31.8 cm'dir. Form yüzeyleri bir CAD (Bilgisayar Destekli Dizayn) programı olan Solidworks programı ile oluşturulmuştur. Oluşturulan yüzeyin ana hatları Şekil 5.3, Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te görülmektedir. Şekil 5.4'te kırmızı olarak görülen yer havanın giriş yerini göstermektedir.

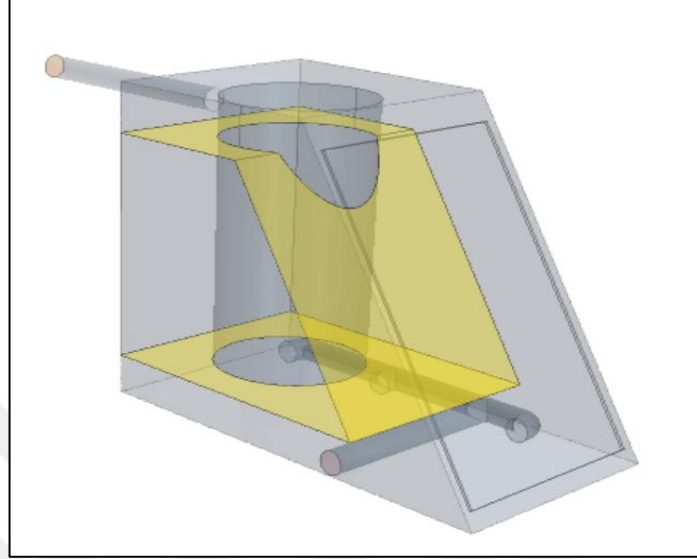


Şekil 5.3. Isı deposunun geometrik olarak oluşturulan katı modeli; ana hatlar



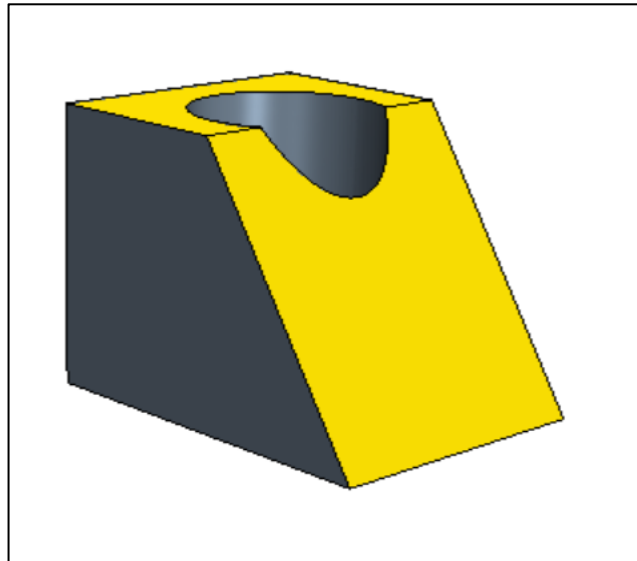
Şekil 5.4. Isı deposunun geometrik olarak oluşturulan katı modeli; dıştan görünüş

Şekil 5.5'te ısı deposunun modellenmiş kısımları görülmektedir. Isı deposuna alttan giren ve ısı deposunun ön, orta ve arka kısmından hava aktaran borular hatları, silindir tank ve taşlar (sarı renkli) bu şekilde görülebilmektedir.

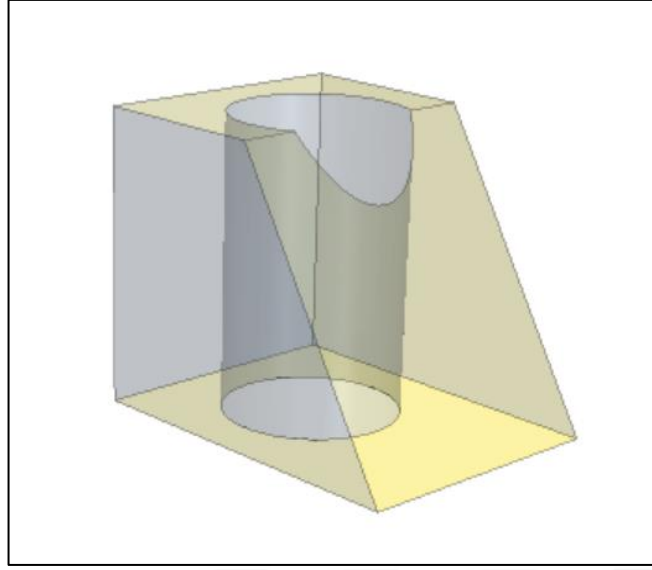


Şekil 5.5. Isı deposunun geometrik olarak oluşturulan katı modeli; şeffaf görünüş

Isı deposu, kabin içerisi silindir tankı saracak şekilde 4-6 cm boyutlarında, 1250 kg bazalt taşı ile doldurulmuştur. Isı deposu içerisinde bulunan bazalt taşları modellenmiş olup geçirgenliği deneyle tespit edilmiş ve 0,47 olarak alınmıştır. Isı deposu içerisindeki bazalt taşları Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de sarı renkli olarak gösterilmiştir.

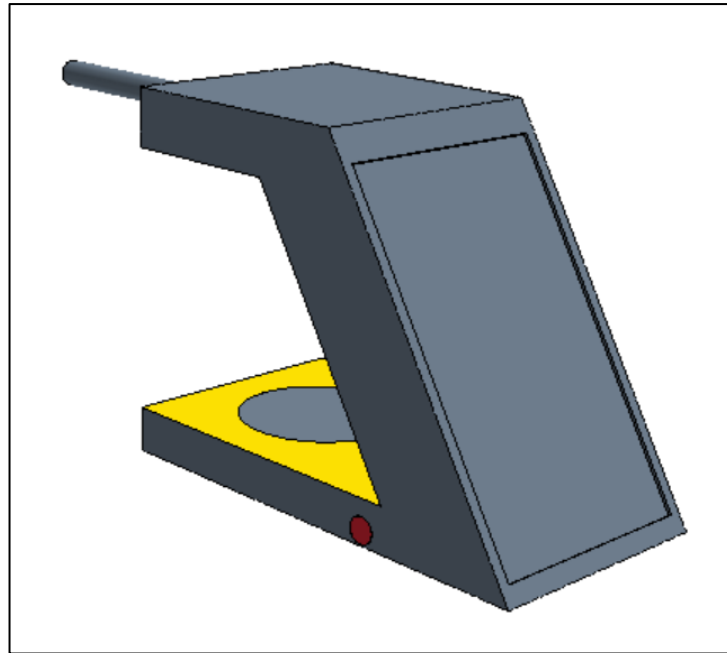


Şekil 5.6. Isı deposu içerisine konulmuş olan bazalt taşlarının modeli

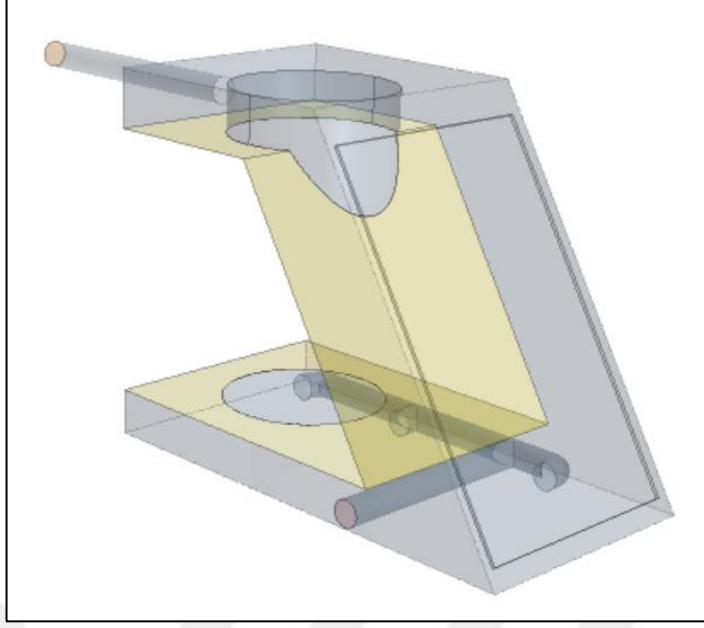


Şekil 5.7. Isı deposu içine konulmuş olan bazalt taşlarının modeli

Hava akışkanlı güneş kolektöründe güneşten gelen enerji havaya aktarılmakta olup ısınan hava, fan kullanılarak Şekil 5.8’de görülen kırmızı noktadan ısı deposuna gönderilmektedir. Isı deposuna giren hava, ısısının bir kısmını taşlara vererek ısı deposunun en arkasından üst kısımdan ısıtılacak odaya aktarılmaktadır. Havanın modellenmesi Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da verilmiştir. Arayüzey (interface) olarak tanımlanmış olup silindir tankın bulunduğu kısım boşluk olarak alınmıştır.

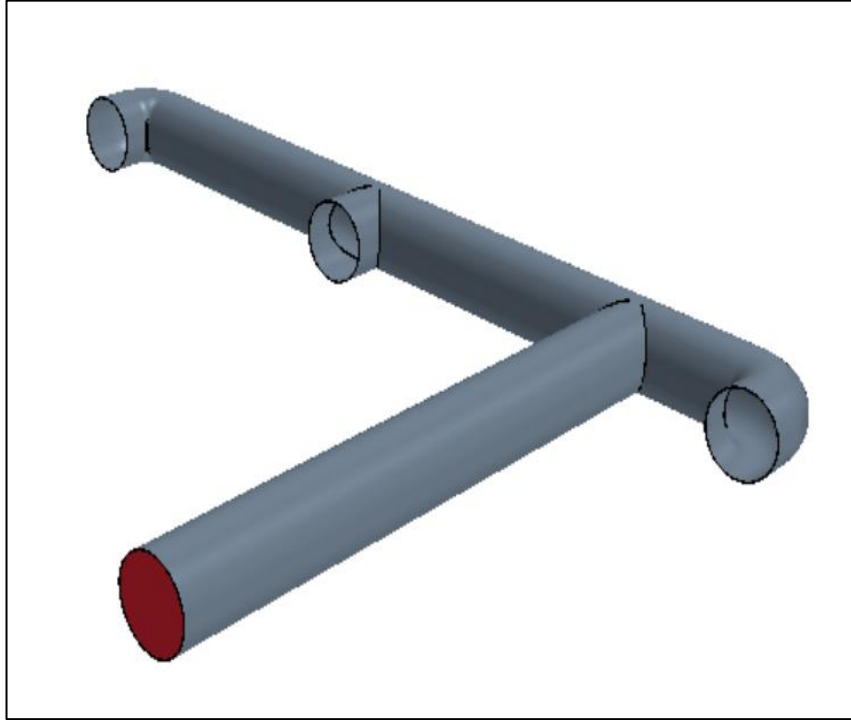


Şekil 5.8. Isı deposu içine fan yardımıyla gönderilen havanın modellenmesi

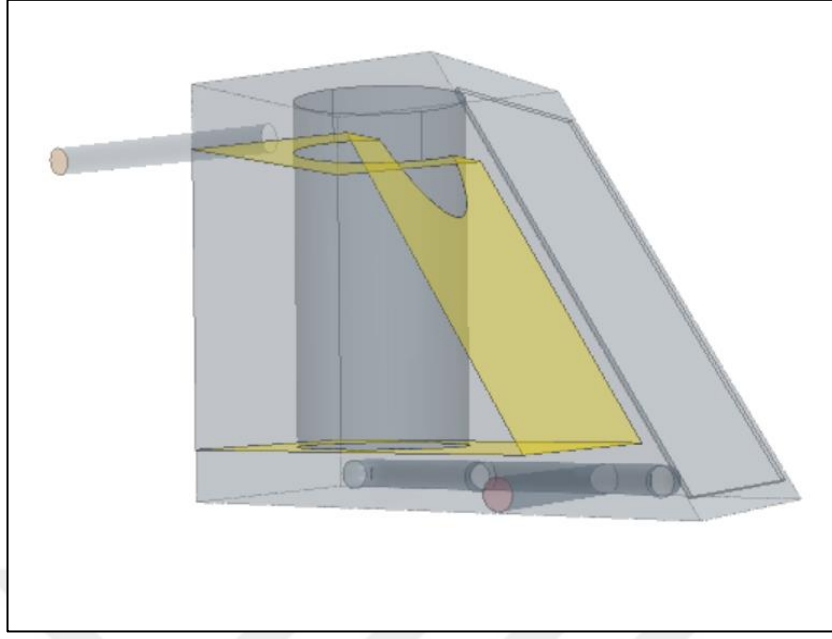


Şekil 5.9. Isı deposu içine fan yardımıyla gönderilen havanın modellenmesi

Kollektör çıkışındaki sıcak havayı ısı deposuna taşımak amacıyla 125 mm çapında PVC borular kullanılmış olup perspektif görünümü Şekil 5.10'da ve ısı deposu içerisindeki görünümü Şekil 5.11'de verilmiştir. Dış basınç (turuncu bölüm) 1 atm olarak tanımlanmıştır.



Şekil 5.10. Sıcak havayı ısı deposuna taşıyan boruların görünümü



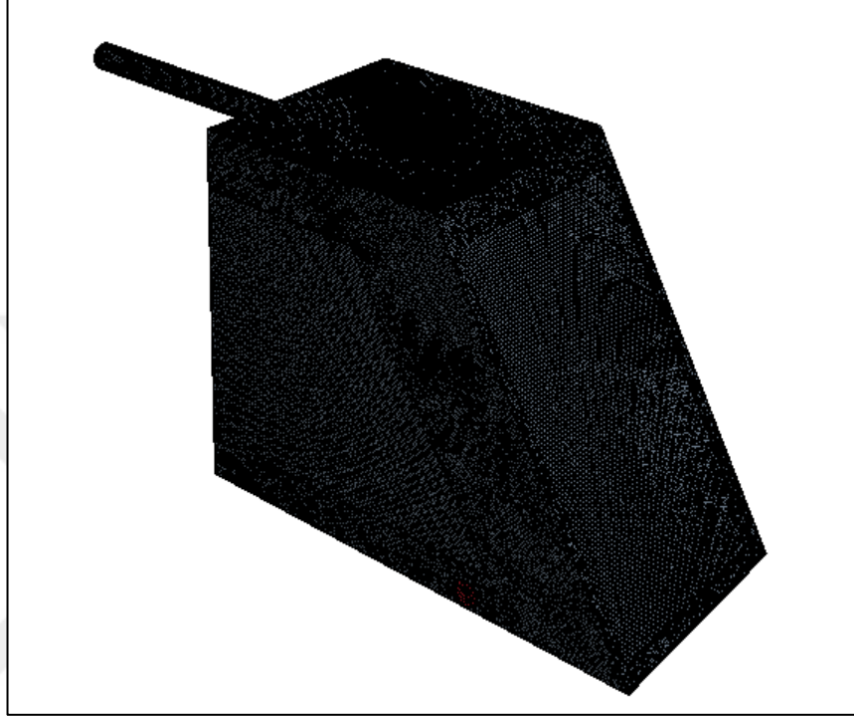
Şekil 5.11. Sıcak havayı ısı deposuna taşıyan boruların ısı deposu içerisindeki görünümü

5.8.4. Ağ yapısının oluşturulması

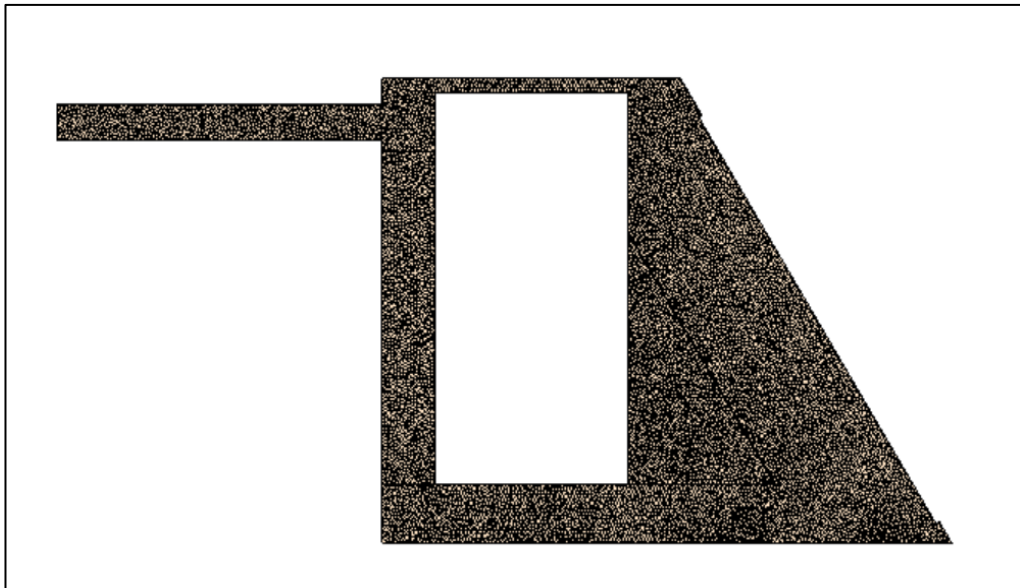
Geometrik modele ağ oluşturma, hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde en önemli süreçlerden bir tanesidir. Oluşturulacak ağın istenen kalitede olması yapılacak çözümünün doğruluğu açısından büyük önem taşımaktadır. Ağ yapısının yoğun oluşturulması HAD analizinin hassasiyetini artırır fakat ağ yapısının gereğinden fazla yoğun olması hesaplama süresini çok arttırabilir ve eldeki bilgisayar kapasitesi ile çözüm yapılamayabilir.

Karmaşık şekle sahip geometrilerin ağ yapısının oluşturulabilmesi amacıyla düzgün olmayan ağ yapıları geliştirilmiştir. Geliştiren bu ağ yapısı karmaşık şekle sahip geometrilerin analizlerinde ve ağ yapısının akış şartlarına uyarlanmasında önemli ölçüde esneklik sağlar. Düzgün olmayan ağ yapısı genel olarak üçgen temelli elemanlardan oluşmuştur. Bu ağ yapısı kullanılarak hesaplama hacmi çok az kullanıcı girdisiyle, neredeyse otomatik hale getirilmesi ve karmaşık şekle sahip geometriler etrafında kolaylıkla oluşturulması mümkün olabilir. Düzgün olmayan ağ yapısı herhangi bir düğümde herhangi bir miktarda elemanın bağlanmasına izin verecek biçimdedir. Temel olarak bu ağ yapısı, otomatik ağ yapısı oluşturma programlarında kullanılmak amacıyla geliştirilmiştir [71].

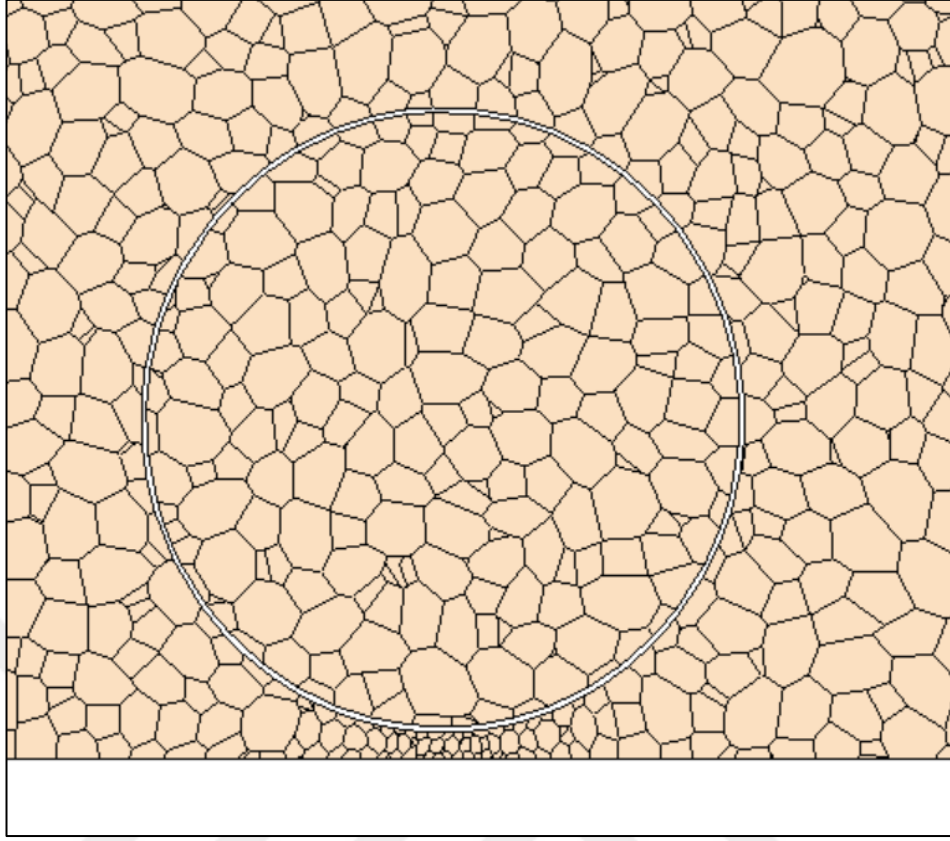
Bu çalışmada üç boyutlu geometrik model için polyhedral (çok kenarlı-altıgene benzer) ağ yapısı seçilmiş olup ağ yapısının oluşturulmasında yaklaşık 2.250.000 hacim elemanı kullanılmıştır (Şekil 5.12). Orta kesitte oluşturulan ağ yapısı Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'te, orta kesit girişte oluşturulan ağ yapısı Şekil 5.15'te görülmektedir.



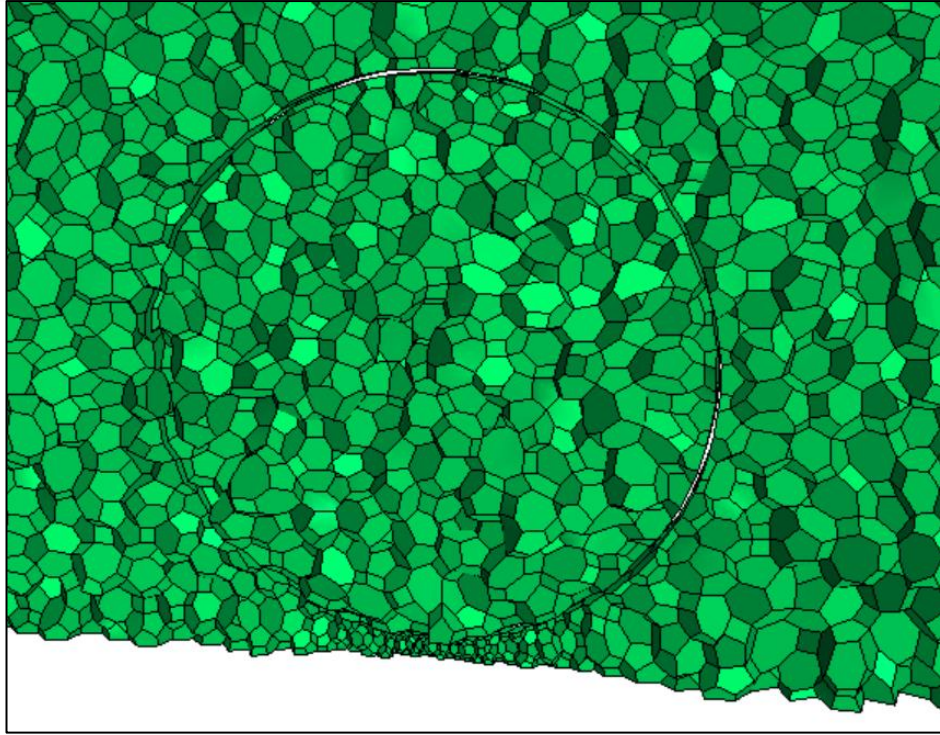
Şekil 5.12. Isı deposu oluşturulan ağ yapısı



Şekil 5.13. Orta kesitte oluşturulan ağ yapısı-1

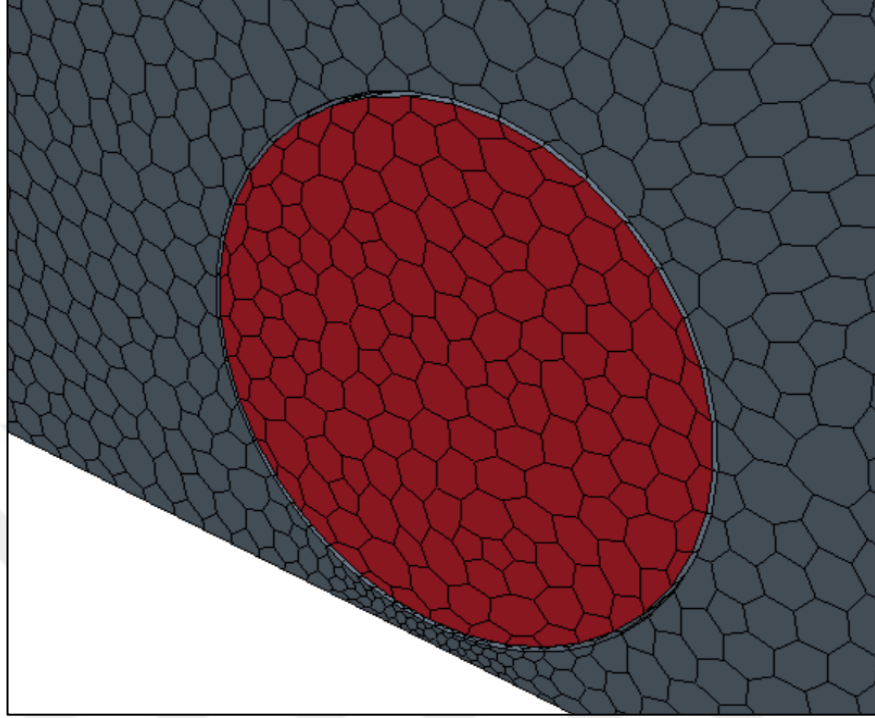


Şekil 5.14. Orta kesitte oluşturulan ağ yapısı-2

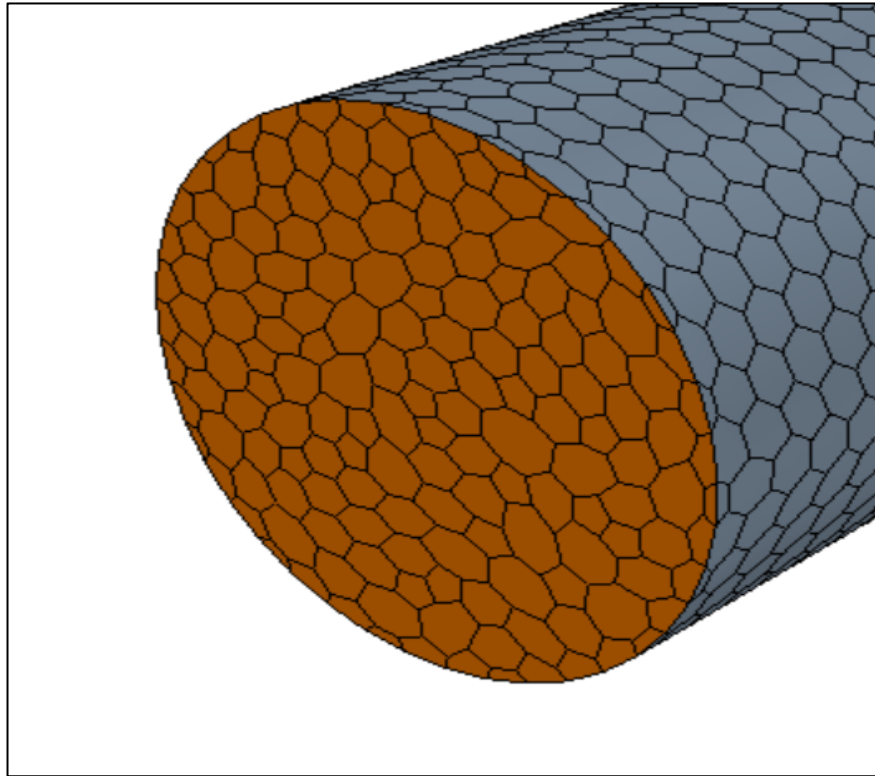


Şekil 5.15. Orta kesit girişte oluşturulan ağ yapısı

Isı deposunun havanın giriş yerinde oluşturulan ağ yapısı Şekil 5.16’da, hava çıkış yerinde oluşturulan ağ yapısı Şekil 5.17’de görülmektedir.



Şekil 5.16. Hava giriş yerinde oluşturulan ağ yapısı



Şekil 5.17. Hava çıkış yerinde oluşturulan ağ yapısı

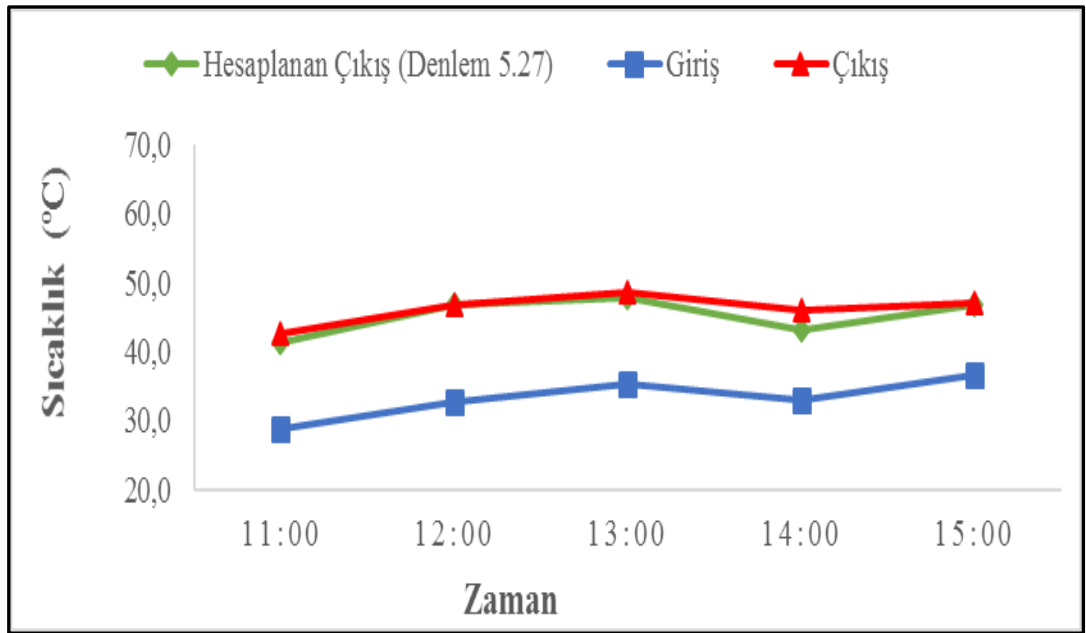
5.8.5. Sınır şartları

Isı deposu yan tarafından ve altından havanın 2 m/s girecek ve havanın ideal gaz olduğu kabulüyle sınır şartları belirlenmiştir. K-ε Türbülans modeli kullanılmıştır. Gözeneklilik viskoz direnci izotropik, gözeneklilik atalet direnci izotropik ve 90,47 kg/m⁴, viskoz direnç 4,4 kg/m³s, katı termal iletkenliği izotropik ve 1,6 W/mK olarak alınmıştır. Tank sıcaklığı sabit ve 51,8 °C ortam sıcaklığı başlangıç 27 °C olarak alınmıştır. Hava saat 14:00 itibariyle güneş ışınımı 851 W/m² HAGK'nde 56,1 °C'ye ısınarak ısı deposuna girmektedir. Modellenen sistem zamana bağlı olarak çözülmüştür. Her bir zaman adımı 0,1 saniye alınmıştır. Yapılan modellemenin analiz değerleri altıncı bölümde "Bulgular ve Tartışma" başlığı altında verilmiştir.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1. Hava Akışkanlı Güneş Kollektörüyle İlgili Yapılan Çalışmalar

Bu çalışmada hava akışkanlı güneş kollektörü (HAGK) ve su akışkanlı güneş kollektörü (SAGK) güneş enerjisini ısı enerjisine dönüştürmekte kullanılmıştır. Elde edilen ısı enerjisi ısı deposuna aktararak güneşin olmadığı zamanlarda kullanılmak üzere depolanmıştır. Isıtılmak istenen mekândan çekilen hava, fan yardımıyla hava HAGK'ye gönderilmiştir. Hava hızı kademeli olarak düşürülerek hava çıkış sıcaklığı gözlemlenmiştir. Hava HAGK'ye 5 m/s giriş hızıyla (0,068 kg/s kütleli debiyle) gönderilmiş daha sonra kademeli olarak giriş hızı düşürülmüş ve kollektörde ısınan havanın sıcaklığı ölçülmüştür. Ölçüm sonucunda hava hızının düşmesine bağlı olarak kollektörden çıkan hava sıcaklığının yükseldiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, yapılan gözlemlerde ve ölçümlerde bu sistemde havanın ısı deposuna yeterli hızla girmesi taşları ısıtarak ısı deposundan geçebilmesi ve ısıtılacak mekâna ulaşması için, havanın en ideal olarak 2 m/s giriş hızıyla (0,027 kg/s kütleli debiyle) HAGK'ye gönderilmesinin uygun olduğu belirlenmiştir. Havanın 5 m/s giriş hızı ile HAGK'ye gönderildiği deney Şekil 6.1'de verilmiştir.



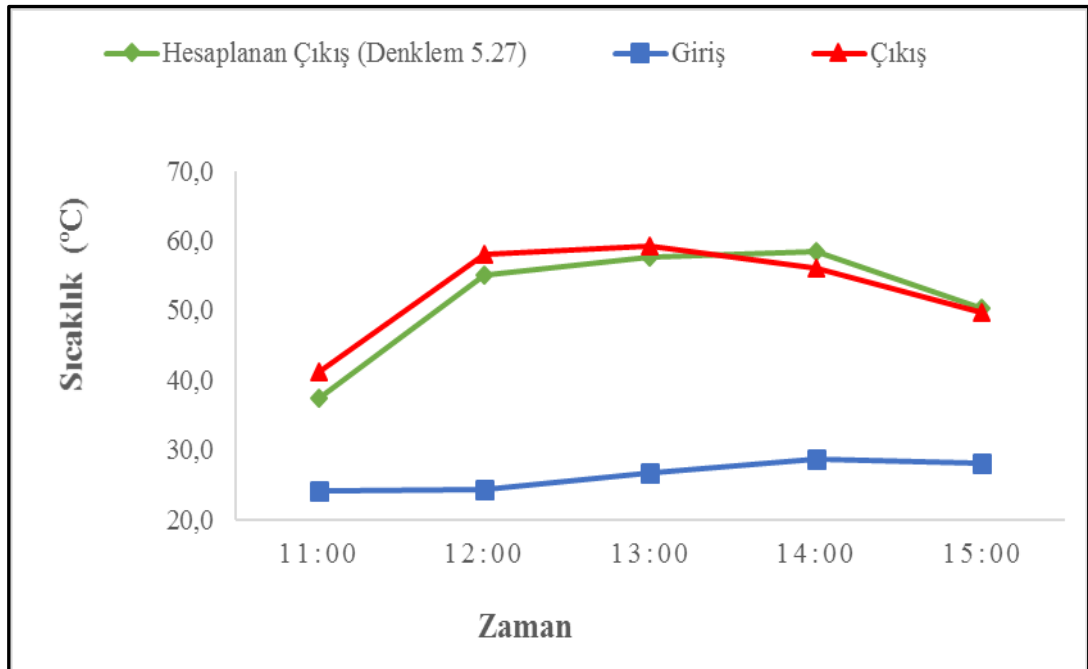
Şekil 6.1. HAGK 5 m/s hava hızında (0,068 kg/s kütleli debide) sıcaklık değerleri

Saat 11:00'te 28,8 °C sıcaklıkta kollektöre giren hava 46,9 °C'ye ısınarak kollektörden çıkmaktadır. Güneş ışınımının artmasıyla kollektörden çıkış sıcaklığı 48,6 °C'ye kadar yükselmekte, güneş ışınımının azalmasıyla da azalmaya başlamaktadır.

Denklem (5.27)'ye göre hesap edilen değerler de karşılaştırmalı olarak Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, hesap edilen kollektör çıkış sıcaklığı ile deneyden elde edilen kollektör çıkış sıcaklığı sonuçlarının uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.

Havanın 2 m/s giriş hızı ile HAGK'ye gönderildiği deney sonuçları Şekil 6.2'de verilmiştir. Saat 11:00'te 24,1 °C sıcaklıkta kollektöre giren hava, 41,2 °C'ye ısınarak kollektörden çıkmaktadır. Güneş ışınımının artmasıyla kollektörden çıkış sıcaklığı 59,3 °C'ye kadar yükselmekte, güneş ışınımının azalmasıyla da azalmaya başlamaktadır.

Hesaplanan kollektör çıkış sıcaklık değerleri de karşılaştırmalı olarak Şekil 6.2'de gösterilmiştir. Denklem (5.27) kullanılarak hesap edilen kollektör çıkış sıcaklığı sonuçları ile deneyden elde edilen kollektör çıkış sıcaklıklarının birbirlerine yakın değerlerde olduğu görülmektedir.

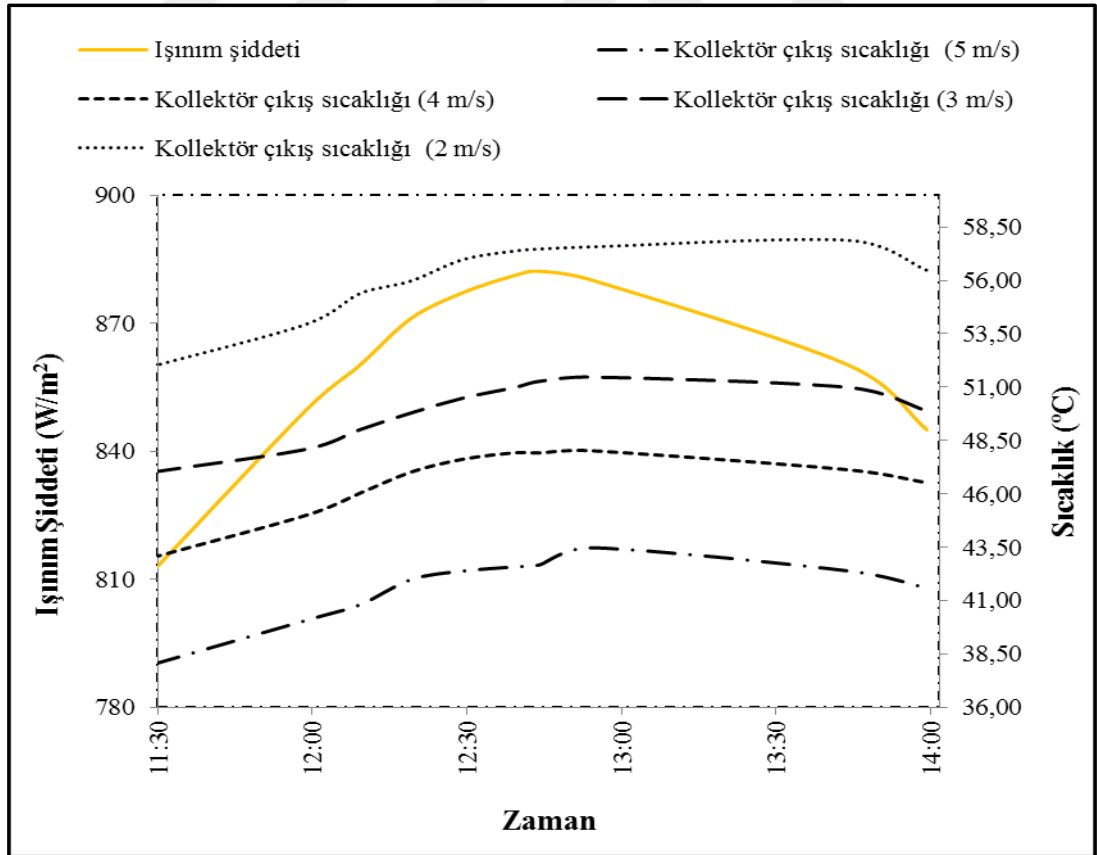


Şekil 6.2. HAGK 2 m/s hava hızında (0,027 kg/s kütleli debide) sıcaklık değerleri

HAGK hava çıkış sıcaklığı; kollektör giriş hızı 5 m/s için yaklaşık olarak 49 °C'ye ulaşabilirken, kollektör giriş hızı 2 m/s olarak ayarlandığında yaklaşık olarak 59 °C'ye

ulaşabilmektedir. Kollektör giriş hızının 5 m/s' den 2 m/s' ye düşürülmesi sonucunda, kollektör çıkış sıcaklığında yaklaşık olarak 10 °C'lik bir artış gözlenmiştir.

Bu konuda yapılan bir başka deney Şekil 6.3'de görülmektedir. Yapılan deneyde 11:30-14:00 arası HAGK 'ye hava giriş hızı 5, 4, 3 ve 2 m/s olacak şekilde (0,068, 0,055, 0,041, 0,027 kg/s kütleli debide) gönderilmiş ve kollektörden çıkış sıcaklıkları ölçülmüştür. HAGK' den çıkış sıcaklıkları ile birlikte güneş ışınımı değerleri de verilmiştir. 12:45'te kollektör hava giriş hızı 5 m/s iken kollektörden ısınarak çıkan hava 43,5 °C'ye ulaşmıştır. Kollektör hava giriş hızının kademeli olarak düşürülmesi ile çıkış sıcaklığı artmıştır. Havanın 2 m/s'ye düşürülmesiyle birlikte, kollektör çıkış sıcaklığının 58,9 °C'ye kadar yükseldiği görülmüştür. HAGK'ye giren hava sıcaklığı 26-28 °C arasındadır. Güneş ışınımı ise 812 ile 882 W/m² aralığında değişmektedir. Bu sistem için basınç kayıpları da göz önüne alınarak; hava basıncının ısı deposunda yeterli seviyede olabilmesi ve ısı deposundan uygun hız ve debide dışarı çıkabilmesi için 2 m/s'nin altında olmaması gerektiği sonucuna da ulaşılmıştır.



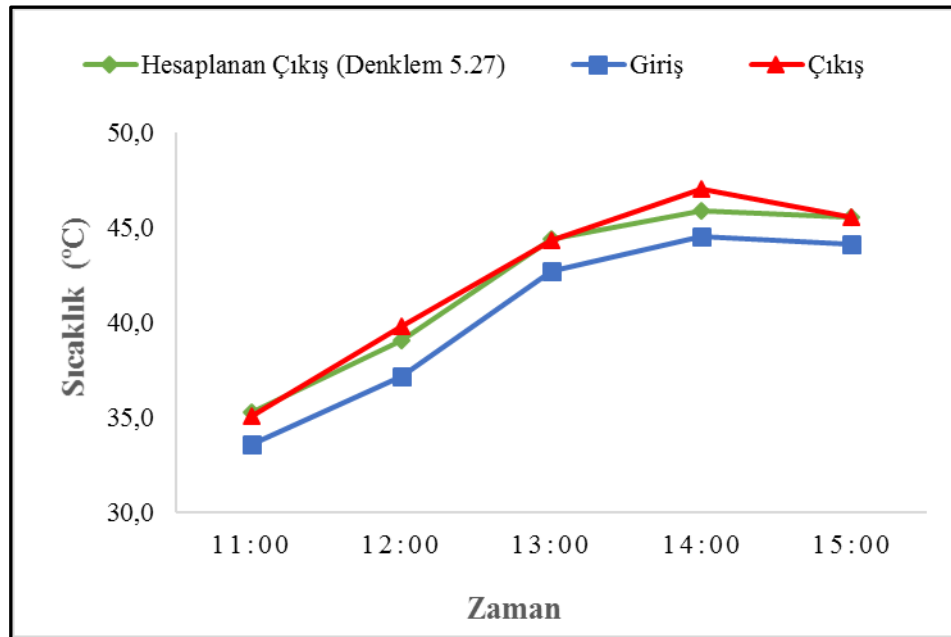
Şekil 6.3. HAGK'ye 5, 4, 3 ve 2 m/s hızlarında (0,068, 0,055, 0,041, 0,027 kg/s kütleli debide) gönderilen havanın kollektörden çıkış sıcaklığı ve güneş ışınımı değerleri

6.2. Su Akışkanlı Güneş Kollektörüyle İlgili Yapılan Çalışmalar

Sistemde, iki adet su akışkanlı güneş kolektörü (SAGK) kullanılmıştır. Ayrıca suyu sistemde dolaştırmak için 1.600 d/d' da çalışan bir sirkülasyon pompası kullanılmıştır. Su akışkanlı güneş kolektörüne gelen güneş ışınımı enerjisini ısı transfer akışkanı olan suya aktarır. Isınan su, ısı deposu içerisindeki su tankını ısıtmakta kullanılmıştır. Tankı ısıtan akışkan enerjisini içerisindeki eşanjörü vasıtasıyla tanka verdikten sonra pompa yardımıyla kolektöre dönmekte ve kolektörde tekrar ısı enerjisiyle yüklenerek ısı deposuna gitmektedir.

SAGK'de yapılan ölçümler Şekil 6.4'te görülmektedir. Saat 11:00'de 33,6 °C sıcaklıkla kolektöre giren su, 35,1 °C'ye kadar ısınmaktadır. Güneş ışınımının artmasıyla birlikte saat 14:00'te kolektöre 44,5 °C sıcaklıkta giren su kolektörde 47 °C'ye ulaşmakta ve su tankını ısıtmak üzere ısı deposuna gönderilmektedir. Kollektöre giren ve ısınarak kolektörden çıkan su sıcaklıklarında 1,5 °C ile 2,5 °C arasında fark olduğu görülmektedir.

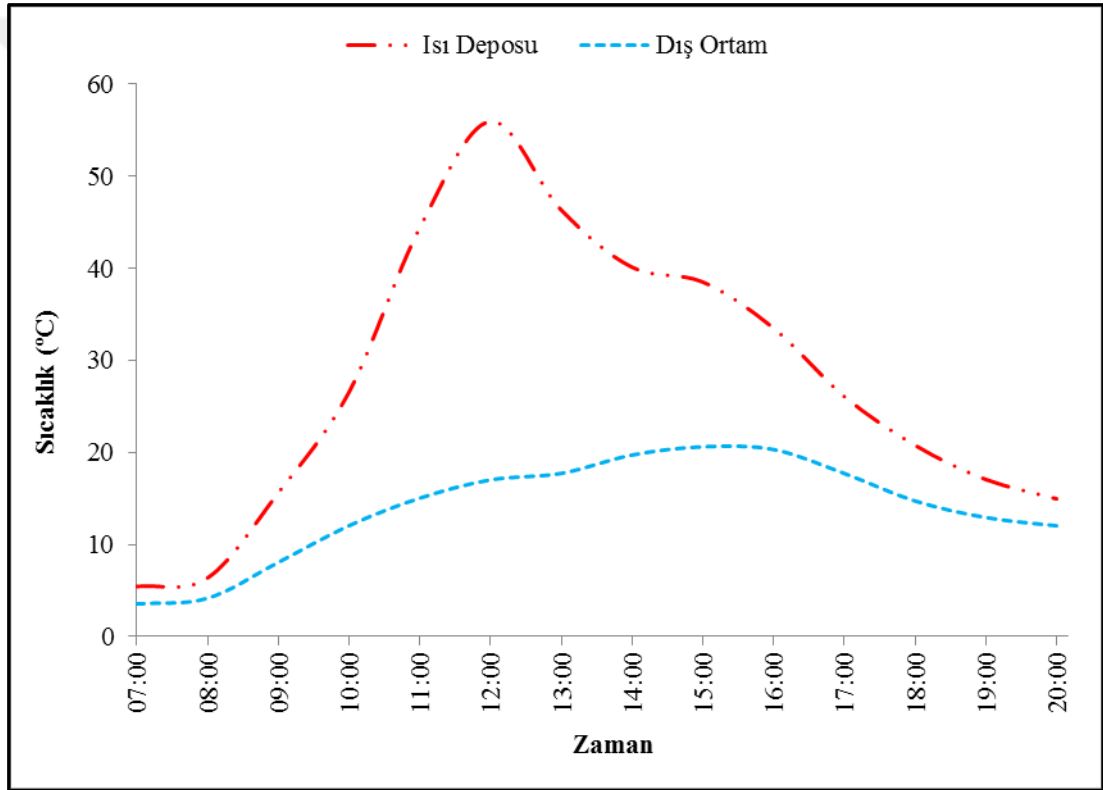
Denklem (5.27)'ye göre hesap edilen değerler de karşılaştırmalı olarak Şekil 6.4'te gösterilmiştir. Denklem (5.27)'ye göre hesap edilen kolektör çıkış sıcaklık sonuçları ile deneyden elde edilen kolektör çıkış sıcaklığı değerlerinin uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 6.4. Su akışkanlı güneş kolektörü sıcaklık değerleri

6.3. Isı Deposuyla İlgili Yapılan Çalışmalar

Isı deposunun farklı tasarımları için ayrı ayrı ölçüm yapılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. İlk tasarımda, ısı deposuna taşlar ve tank konulmaksızın sadece içindeki durgun havanın sıcaklığının değişimi izlenmiştir. Isı deposunun güney cephesinde eğimli cam yüzey olması nedeniyle, bir güneş kolektörü gibi davranan ısı deposunun içerisindeki durgun havanın ısınma grafiği Şekil 6.5’ de gösterilmiştir. Isı deposu içerisindeki durgun hava sıcaklığının güneşin doğmasıyla birlikte arttığı, güneşin etkisini arttırmasıyla birlikte dış ortam sıcaklığı 17,7 °C iken 55,9 °C’ye kadar yükseldiği görülmüştür.

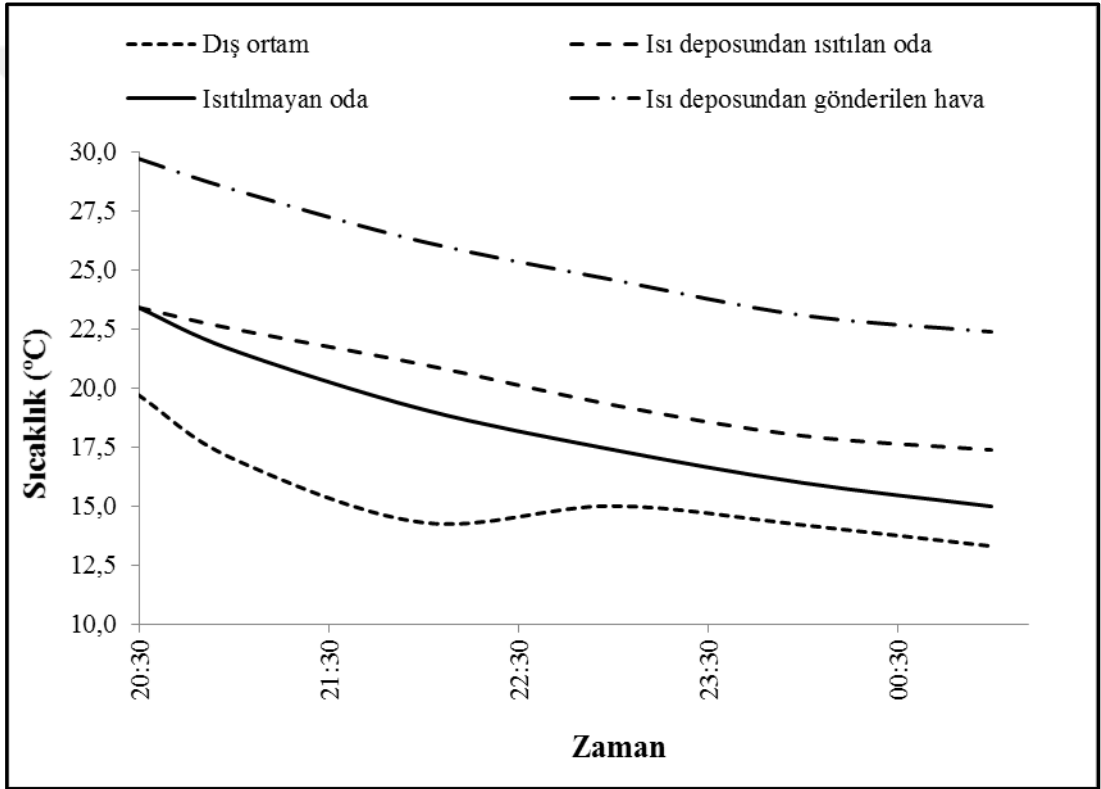


Şekil 6.5. Isı deposu içerisi boşken güney cepheden gelen güneş ışınımı etkisiyle ısı deposunun ısınması, ısı deposu ve dış ortam sıcaklık değerleri

İkinci tasarımda, ısı deposu içerisindeki tankta su depolanmış ancak kabin içine taşlar halen konulmamıştır. Su tankı SAGK ile ısıtılarak, ısı sadece suda depolanmıştır. Bu durumda yapılan deneyde ısı deposunun performansı Şekil 6.6’da gösterilmiştir.

İkinci tasarımda ısı deposunda depolanan ısı ile ortam (konteyner) ısıtılmış ve eş olan diğer ortam ısıtılmayarak aralarındaki fark karşılaştırılmıştır. Ortamların ısınması için,

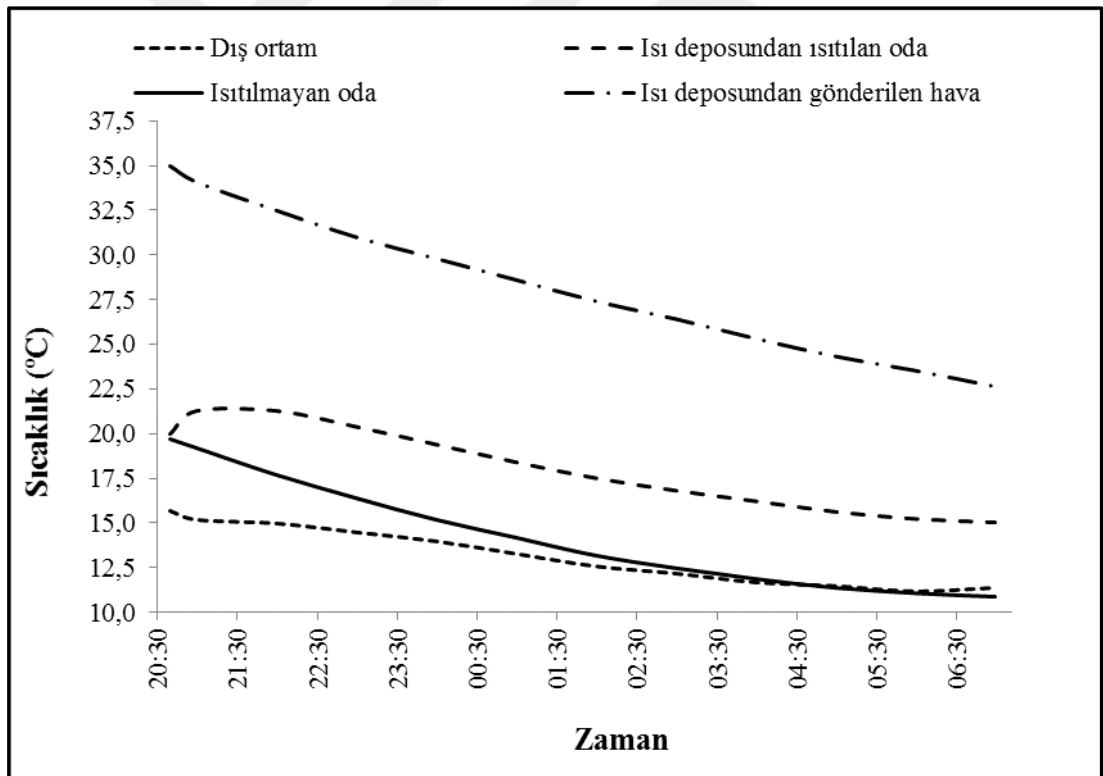
fan ile ısı deposuna hava gönderilmiş ve tank etrafında hava dolaştırılarak ısınan hava ortama aktarılmıştır. Dış hava sıcaklığı saat 21:00'den saat 01:00'e kadar 17 °C' den 13 °C' ye kadar azalırken ısı deposundan aktarılan sıcak havayla ısıtılan oda ve hiç ısıtılmayan eş odanın sıcaklıkları zamanla dış hava sıcaklığına bağlı olarak azalmıştır. İki oda arasında maksimum 2,4 °C'lik fark oluşmuştur. Isı deposundan ortama gönderilen havanın sıcaklığı 28,4 °C'den 22,4 °C' azalmıştır. Hava ile tank arasındaki ısı transferi etkileşiminin az olması nedeniyle (taşlarla olan ısı transferine kıyasla) performansın düşük olduğu ancak tankta depolanan ısının da kısmen ısı deposuna aktarılabilceği tespit edilmiştir.



Şekil 6.6. Tank içindeki suda ısı depolayan (içerisine bazalt taşları yerleştirilmeyen) ısı deposu ile mekân ısıtılmasına ait sıcaklık değerleri

Üçüncü tasarımda ısı deposuna, su tankı etrafına bazalt taşları da yerleştirilmiş ve ısı depolaması yapılmıştır. Bazalt taşları GAHK ile ısıtılan hava vasıtasıyla ve güney cepheden direkt güneş ışınımı ile ısıtılmıştır. Tank ise SAGK ile ısıtılan su vasıtasıyla ısıtılmıştır. Isı deposunun üçüncü tasarımı ile mekân ısıtma performansı Şekil 6.7' de görülmektedir.

Dış hava sıcaklığı saat 21:00'den saat 07:00'ye kadar 15,7 °C' den 11,2 °C' ye azalırken ısı deposundan gönderilen sıcak havayla ısıtılan oda ve hiç ısıtılmayan eş odanın sıcaklıkları Şekil 6.7'de görülmektedir. Her iki oda da 20 °C sıcaklıkta iken ısı deposundan ısıtılan oda sıcaklığı 21,3 °C ye kadar yükselmiş, sonrasında 15 °C'ye düşmüştür. Isıtılmayan oda sıcaklığı ise dış hava sıcaklığının düşmesine bağlı olarak 20 °C'den 10,9 °C'ye kadar düşmüştür. İki oda arasında maksimum 4,3 °C'lik fark olduğu görülmüştür. Isı deposundan ısıtılan odaya gönderilen hava sıcaklığı 35 °C'den başlamış 22,6 °C'ye kadar düşmüştür. Oda sıcaklığının 20,4 °C olduğu saat 23:00'te odaya gönderilen hava sıcaklığının 31 °C olduğu görülmektedir. Bu sistemde ısıtılması istenen odayı 20 °C'de tutabilmek için en az 10 °C fazla olacak şekilde, yani 30 °C sıcakta, odaya hava gönderilmesi gerektiği görülmüştür. Dış hava sıcaklığının daha düşük olması durumunda ise daha yüksek sıcaklıklara ihtiyaç olacağı anlaşılmaktadır.



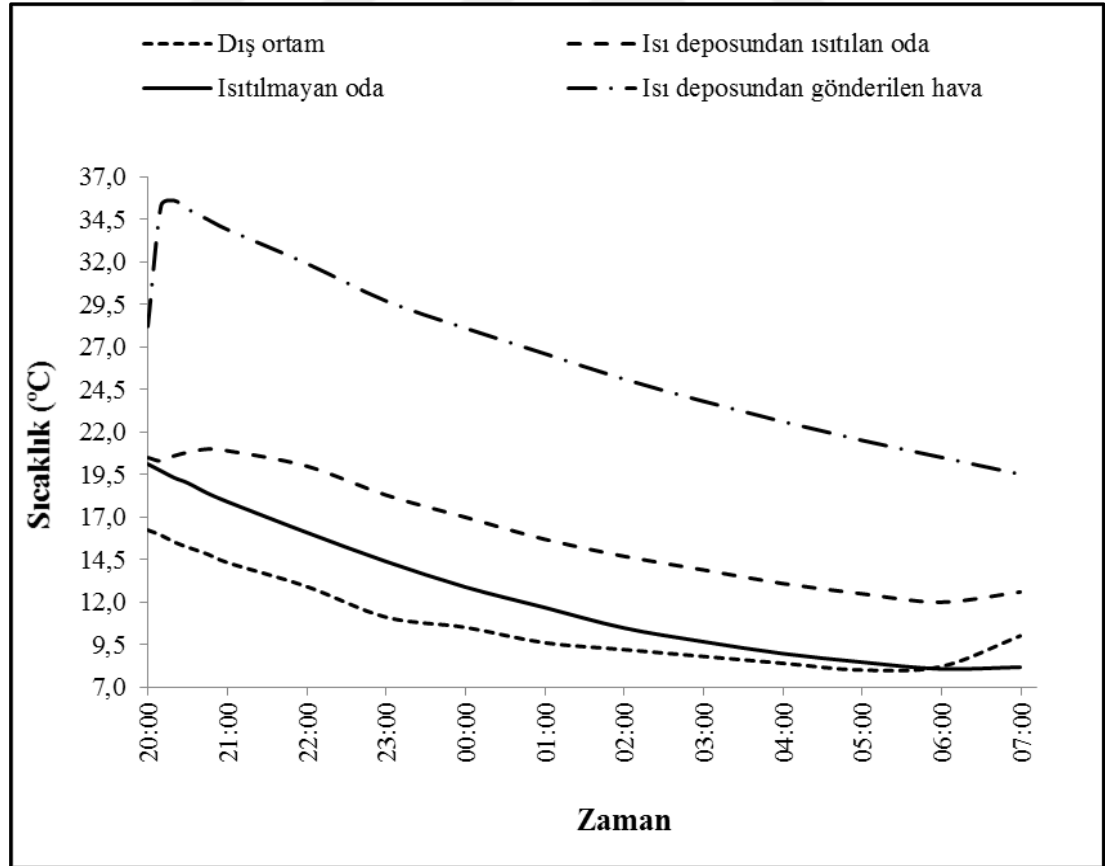
Şekil 6.7. İçerisine bazalt taşları yerleştirildikten sonra (tank içerisinde hem suda hem de bazalt taşında ısı depolayan) ısı deposu ile mekân ısıtmasına ait sıcaklık değerleri

Bir önceki tasarımda taşlar ve suda ısı enerjisi depolanırken son tasarımda orta bölümüne boş olan tankın bu bölümüne faz değiştiren madde olan parafin wax da yerleştirilmiş ve ölçümler tekrarlanmıştır. SAGK'den gelen ısınmış su ile hem parafin wax hem de

tankta bulunan su ısıtılmıştır. Isı deposunun bu haliyle mekân ısıtma performansı Şekil 6.8’de görülmektedir.

Dış hava sıcaklığı saat 20:00’den saat 06:00’ya kadar 16 °C’den 8 °C’ye azalırken ısı deposundan gönderilen sıcak havayla ısıtılan oda ve hiç ısıtılmayan eş odanın sıcaklıkları Şekil 6.8’de görülmektedir.

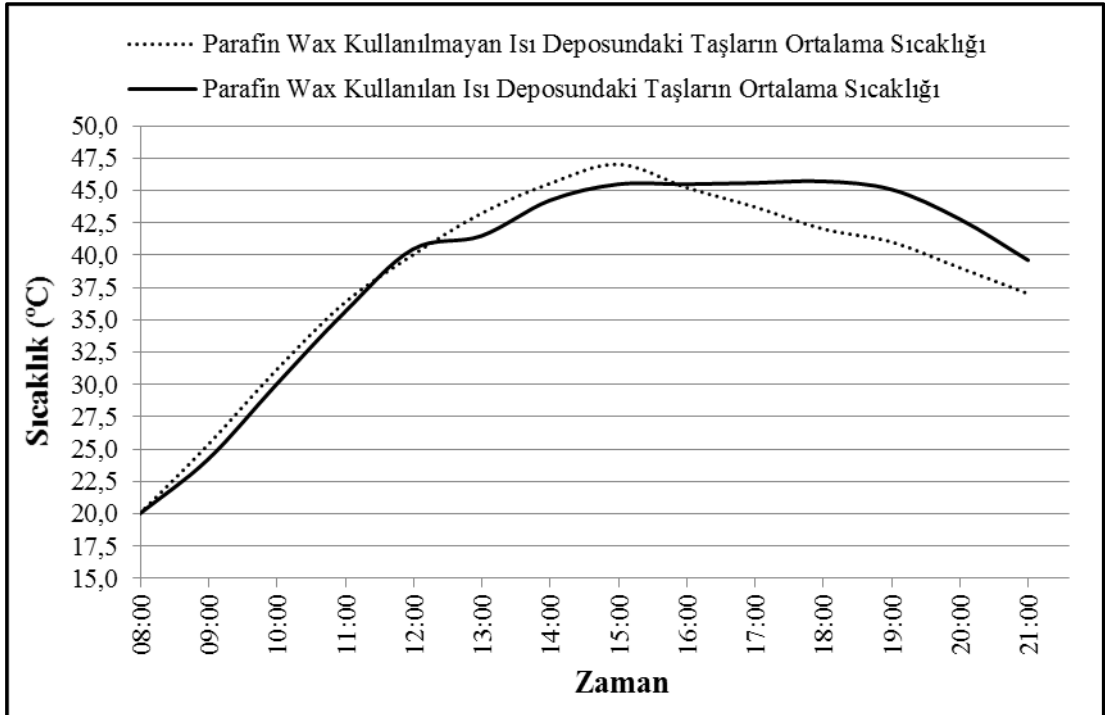
Her iki oda da başlangıçta 20 °C sıcaklıkta iken ısı deposundan ısıtılan oda sıcaklığı 21 °C’ye kadar yükselmiş, sonrasında 12 °C’ye düşmüştür. Isıtılmayan oda sıcaklığı ise dış hava sıcaklığının düşmesine bağlı olarak 20 °C’den 8,1 °C’ye kadar düşmüştür. İki oda arasında maksimum 4,4 °C’lik fark olduğu görülmektedir. Dış hava sıcaklığı diğer iki deneye göre daha düşük olmasına rağmen en büyük fark bu deneyde elde edilmiştir. Isı deposundan ısıtılan odaya gönderilen hava sıcaklığı 35,6 °C’den başlamış 19,5 °C’ye kadar düşmüştür. Oda sıcaklığının 20 °C olduğu saat 22:00’de odaya gönderilen hava sıcaklığının 31,9 °C olduğu görülmektedir.



Şekil 6.8. Bazalt taşları ile birlikte tank içerisindeki bölmeye parafin wax da yerleştirildikten sonra (tank içerisinde suda ve parafin waxta, kabin içerisinde bazalt taşında ısı depolayan) ısı deposu ile mekân ısıtmasına ait sıcaklık değerleri

Bölüm 4'te, 4.4.1. başlığı altında anlatılan deneyde ısı deposunda faz değiştiren madde kullanımının etkisi araştırılmıştır. Faz değiştiren madde (parafin wax) kullanılmasıyla, kullanılmaması durumunda ısı deposunun durumuyla ilgili elde edilen sonuçlar Şekil 6.9'da verilmiştir. Isı deposu sıcaklığı olarak verilen değerler taşların ortalama sıcaklığını göstermektedir. Parafin wax kullanılan ve kullanılmayan ısı depolarının her ikisinde de saat ~14:00 e kadar yaklaşık olarak aynı oranda sıcaklık artışı gerçekleşmiştir. Bu saatten sonra parafin wax kullanılmayan ısı deposunun sıcaklığı hızla düşerken parafin wax kullanılan ısı deposunda, sıcaklığın çok geniş bir zaman aralığında (yaklaşık saat 14:30-19:00 aralığında) yaklaşık 45 °C civarında sabit kaldığı görülmüştür. Faz değiştiren maddeler termal enerjiyi gizli ısı şeklinde depolayan maddeler olup faz değişiminin sabit sıcaklıkta olduğu göz önüne alındığında ısı deposunun sıcaklığının sabit kalmasına bunun sebep olduğu düşünülmektedir.

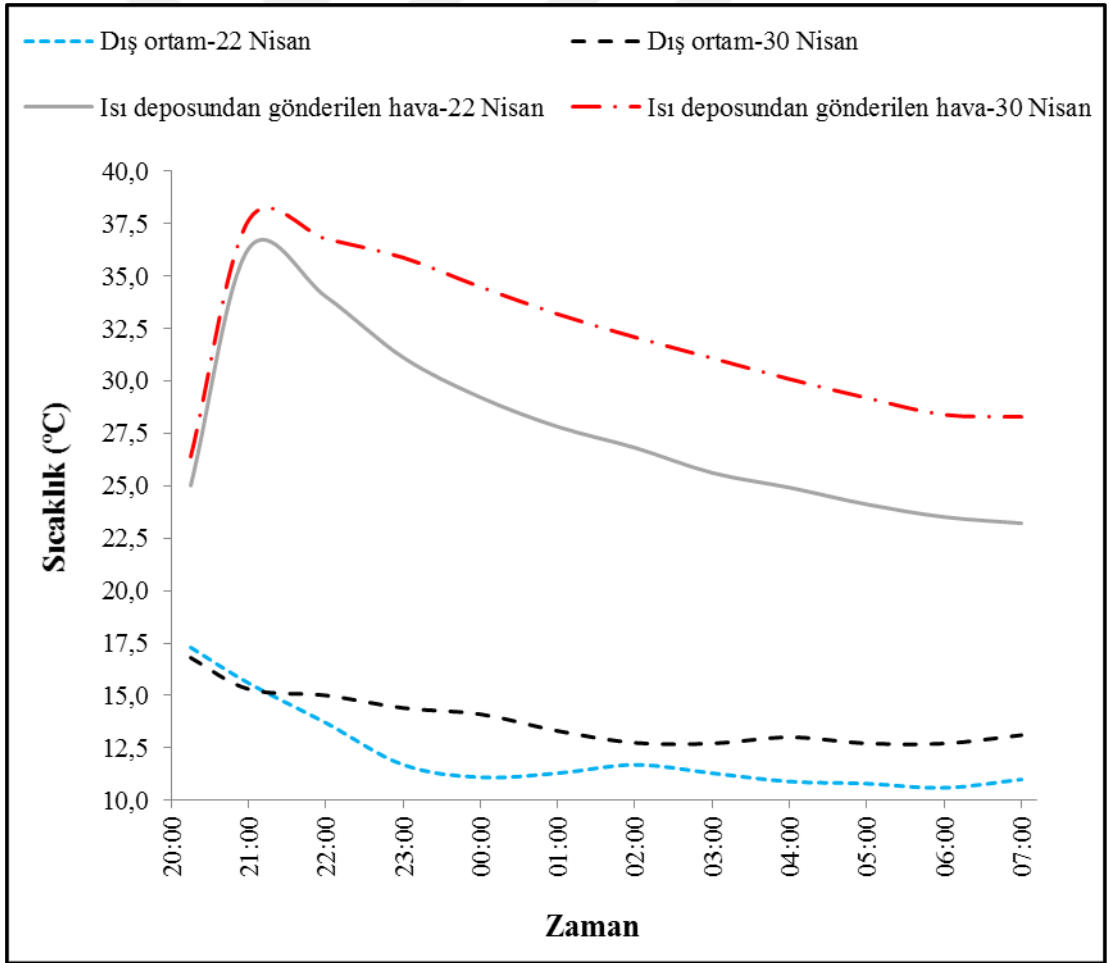
Yapılan deneylerde ısı deposundaki taşların sıcaklığının depo içerisindeki tank sıcaklığına göre daha hızlı düştüğü, taşların arasında bulunan tankın ısı deposunun daha verimli hale gelmesini sağladığı görülmüştür. Tank içerisinde parafin wax kullanılması durumunda %9,9 daha fazla miktarda ısı depolanabileceği ve ısı deposunun daha uzun süre sıcaklığını muhafaza edebileceği görülmüştür.



Şekil 6.9. Parafin wax kullanılmayan ve parafin wax kullanılan ısı deposundaki taşların ortalama sıcaklıkları

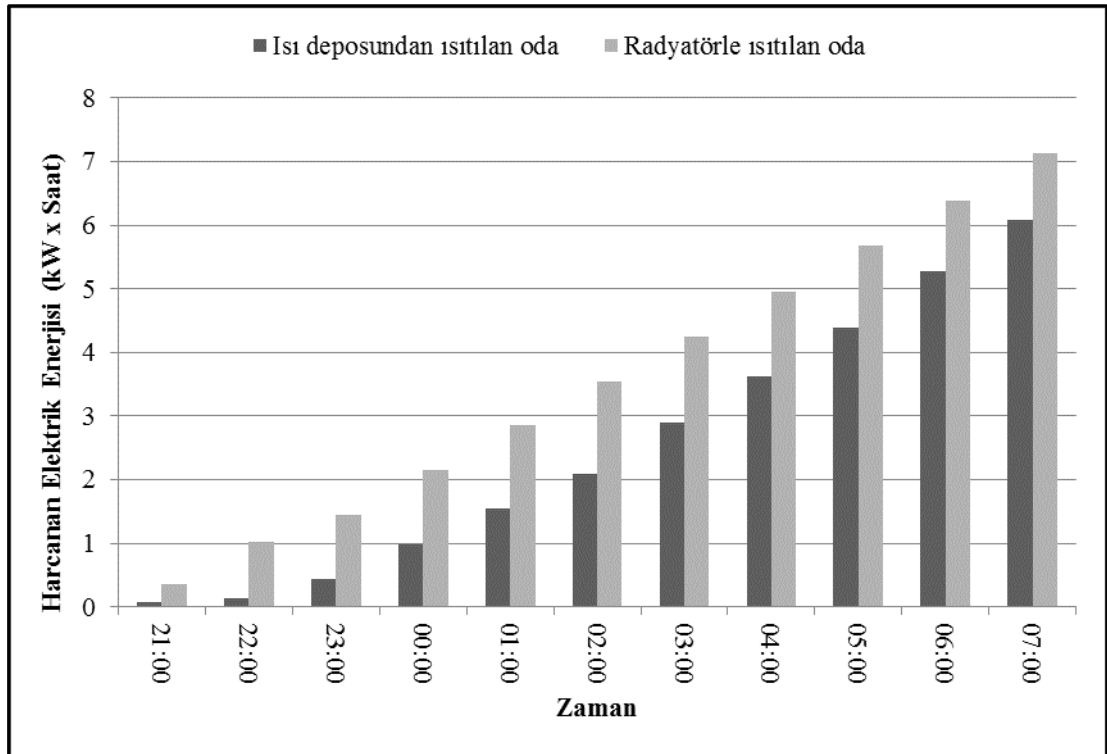
Faz değiştiren madde kullanılan sistemle kullanmayan sistemin farklarını ortaya koyabilmek maksadıyla mekân ısıtmasındaki performansı da incelenmiştir. Karşılaştırma deneyleri sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 6.10'da verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere parafin waxın kullanıldığı ısı depolama sisteminde ısı deposundan gönderilen hava sıcaklığının daha yüksek olduğu, 37,7 °C'den başlayarak 28,3 °C'ye kadar düştüğü görülmektedir. Parafin waxın kullanılmadığı ısı depolama sisteminde ise bu sıcaklığının 36,3 °C'den başlayarak 23,2 °C'ye düştüğü görülmektedir.

Faz değiştiren madde kullanılan ısı deposu sıcaklığının kullanılmayan ısı deposu sıcaklığına göre daha geç azaldığı görülmüştür. Böylelikle faz değiştiren madde kullanmanın ısı deposundan daha uzun süre istifade etmeyi sağlayacağı anlaşılmaktadır.



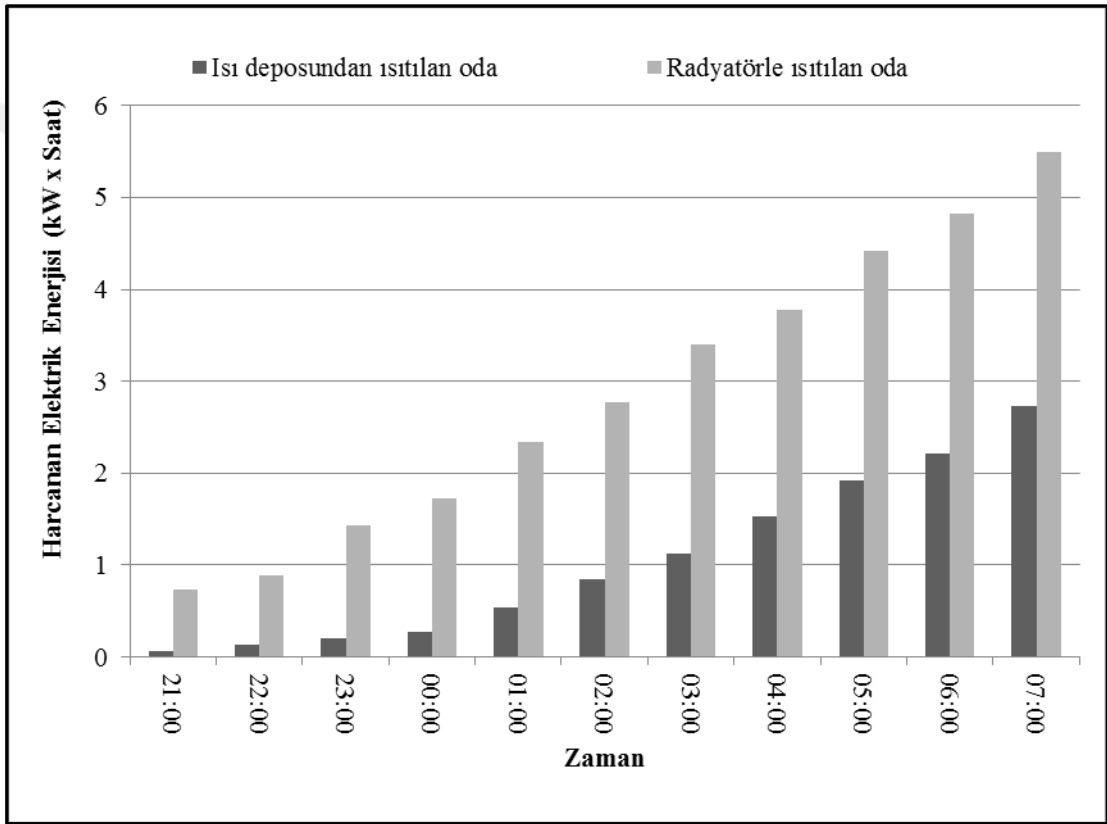
Şekil 6.10. 22 Nisan parafin wax kullanılmayan ve 30 Nisan'da parafin wax kullanılan sistemler için dış ortam sıcaklık değerleri ile ısı deposundan mekâna gönderilen sıcaklık değerleri

Bir başka ölçüm ile ısı deposundan ne kadar elektrik enerjisi tasarrufu sağlayacağını tespit edilmesi amaçlanmıştır. Birbirine eş olan iki konteyner bu maksatla kullanılmıştır. Mekanların her ikisine de elektrik ile çalışan yağlı radyatörler yerleştirilmiştir. Oda sıcaklıkları 20 °C olacak şekilde oda termostatları ayarlanmıştır. Mekanlardan bir tanesi sadece elektrikle diğeri ise öncelikli olarak ısı deposundan, ısı deposu yeterli gelmediğinde ise elektrikli radyatörle ısıtılacak şekilde ayarlanmıştır. Deneysel saat 20:15'te başlatılmış olup elektrikli ısıtıcılar tarafından mekanlarda harcanan toplam elektrik enerjisi ölçülmüştür. Parafin wax kullanılmadan yapılan deneye ait grafik Şekil 6.11'de, parafin wax kullanılarak yapılan ölçümler ise Şekil 6.12'de görülmektedir. Grafikte görülen değerler elektrikli ısıtıcılar tarafından o saate kadar harcanan toplam elektrik enerjisini göstermekte olup aradaki fark ısı deposunda depolanan güneş enerjisinden sağlanmıştır. Parafin wax kullanılmayan deneyde saat 23:00'e kadar %70,1'i, saat 02:00'ye kadar %40,7'si, saat 05:00'e kadar %22,8'i, saat 07:00'ye kadar %14,5'i ısı deposundan sağlanmıştır. Deney sonunda ısı deposu kullanılmayan mekânda elektrikli ısıtıcı 7,1 kWh enerji harcamış ısı deposu kullanılan mekânda ise 6,1 kWh enerji elektrikli ısıtıcıdan 1,0 kWh enerji ise ısı deposundan sağlanmıştır.



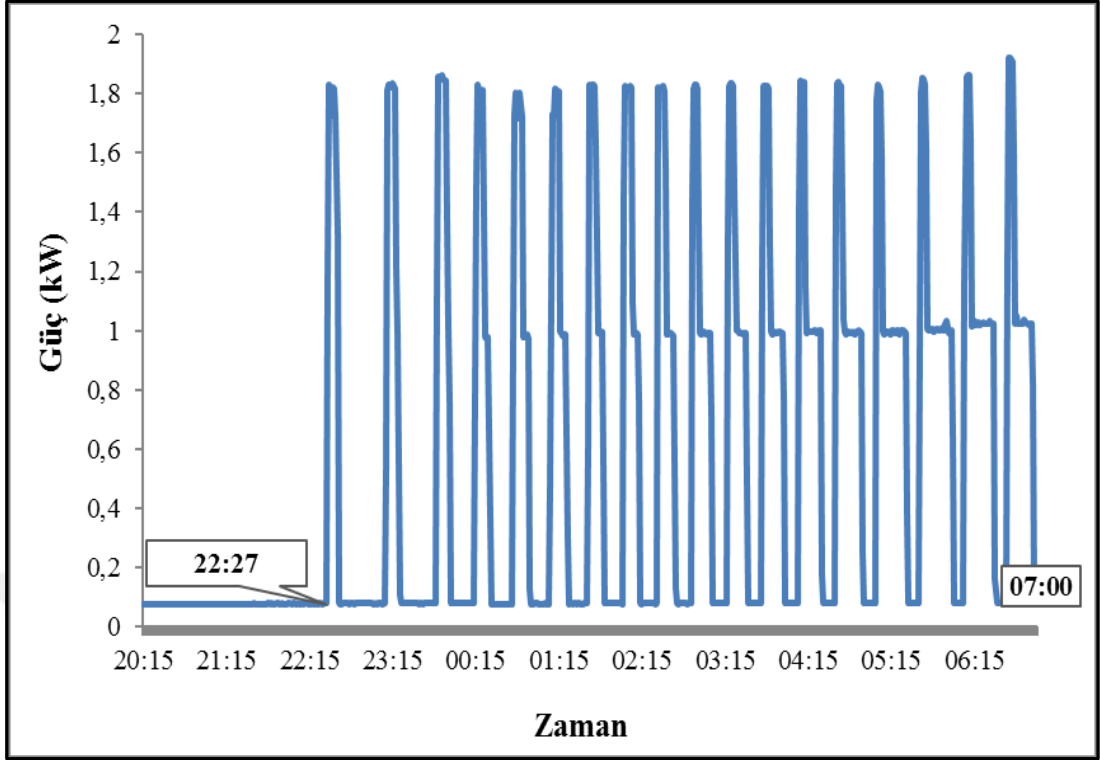
Şekil 6.11. Isı deposu kullanılan ve ısı deposu kullanılmayan mekânların harcadığı elektrik enerjisi değerleri (Isı deposunda parafin wax kullanılmamıştır)

Parafin wax kullanılan deneyde ise saat 23:00'e kadar %85,3'ü, saat 02:00'ye kadar %69,7'si, saat 05:00'e kadar %56,6'sı, saat 07:00'ye kadar %50,3'ü ısı deposundan sağlanmıştır. Deney sonunda ısı deposu kullanılmayan mekânda elektrikli ısıtıcı 5,5 kWh enerji harcamış ısı deposu kullanılan mekânda ise 2,7 kWh enerji elektrikli ısıtıcıdan 2,8 kWh enerji ise ısı deposundan sağlanmıştır. Güneşten depolanan ısının başlangıçta yüksek oranda ısıtma ihtiyacını karşıladığı ancak ısı deposunun etkisini yitirmesiyle aradaki farkın kapandığı görülmektedir. Parafin wax kullanmanın ısı deposu verimini artırdığı bu grafiklerde de görülmektedir.

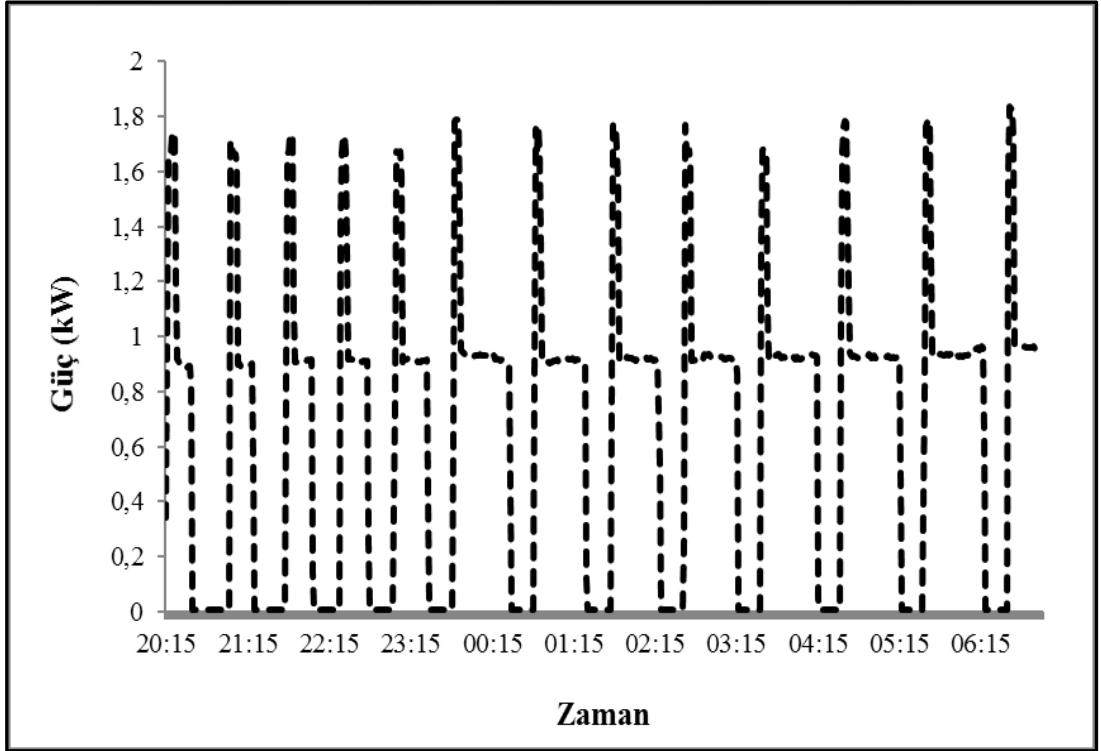


Şekil 6.12. Isı deposu kullanılan ve ısı deposu kullanılmayan mekânların harcadığı elektrik enerjisi değerleri (Isı deposunda parafin wax kullanılmıştır)

Parafin wax kullanılmadan yapılan deney 20:15 ten sabah 07:00'ye kadar sürmüş olup, ısı deposundan ısıtılan odada 22:27'ye kadar elektrikli ısıtıcının çalışmasına gerek kalmamıştır (Şekil 6.13). Isı deposu kullanılmayan, sadece elektrikle ısıtılan mekânda ise elektrikli ısıtıcı sürekli çalışmıştır (Şekil 6.14).

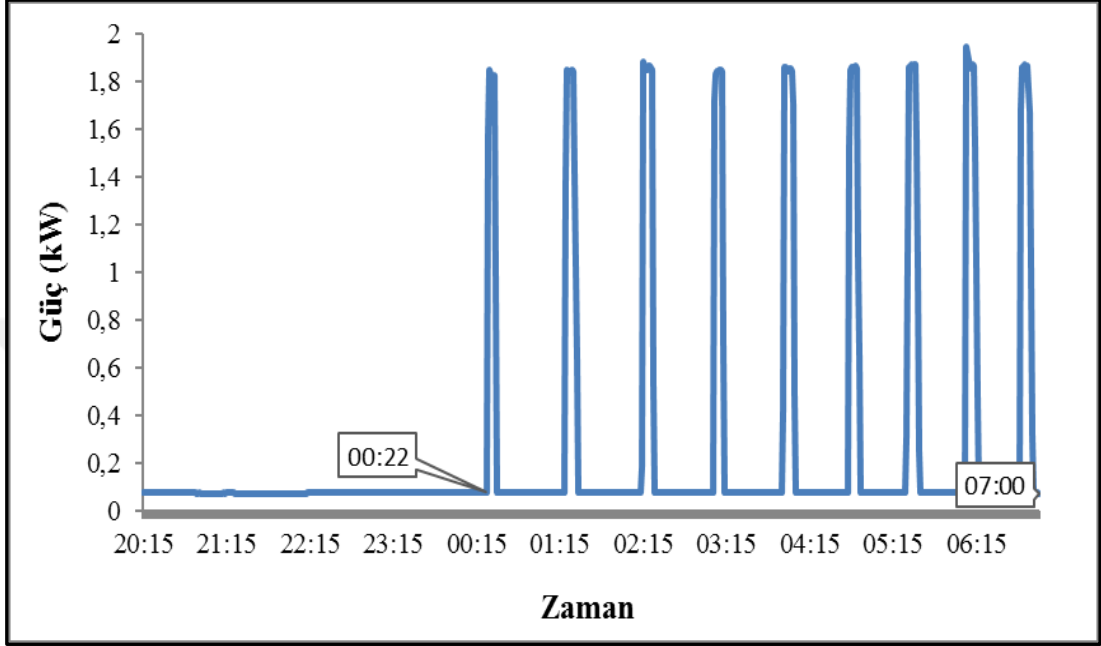


6.13. Isı deposu kullanılan mekânda ısıtıcının çektiği elektrik gücü (Isı deposunda parafin wax kullanılmamıştır)

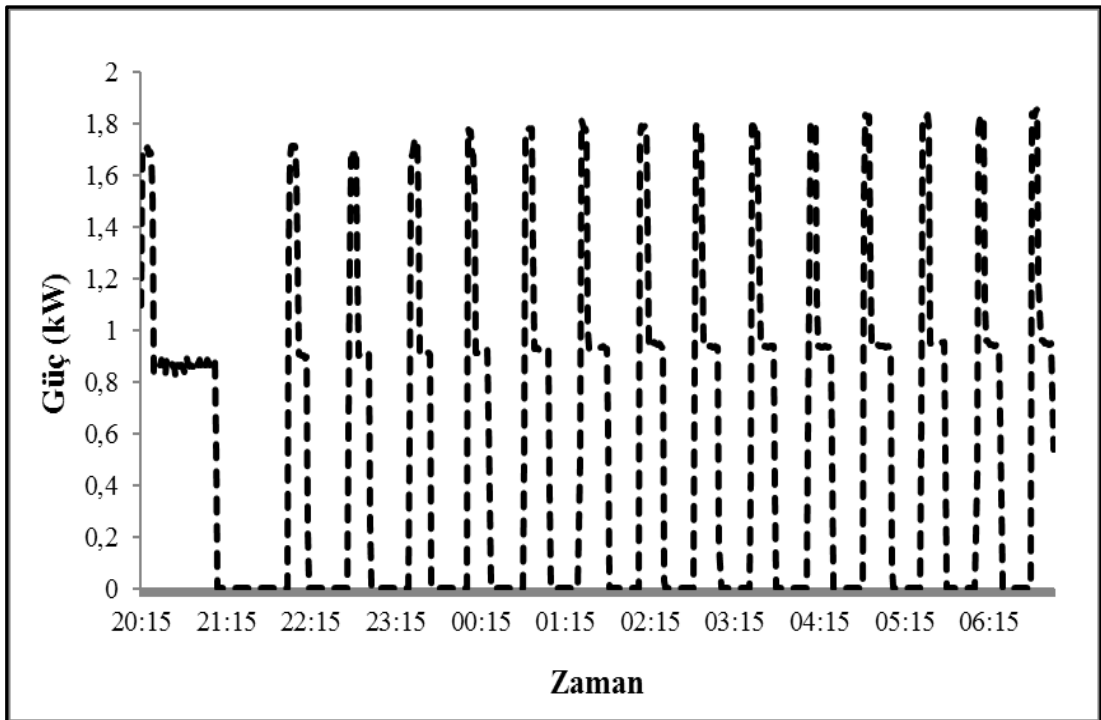


Şekil 6.14. Isı deposu kullanılmayan mekânda ısıtıcının çektiği elektrik gücü

Parafin wax kullanılarak yapılan deney de 20:15'ten sabah 07:00'ye kadar sürmüştür. Bu deneyde ısı deposundan ısıtılan odada 00:22'ye kadar elektrikli ısıtıcı çalıştırılması gerekmemiştir (Şekil 6.15). Isı deposu kullanılmayan sadece elektrikle ısıtılan mekânda ise elektrikli ısıtıcı sürekli çalışmıştır (Şekil 6.16).



Şekil 6.15. Isı deposu kullanılan mekânda ısıtıcının çektiği elektrik gücü (Isı vdeposunda parafin wax kullanılmıştır)

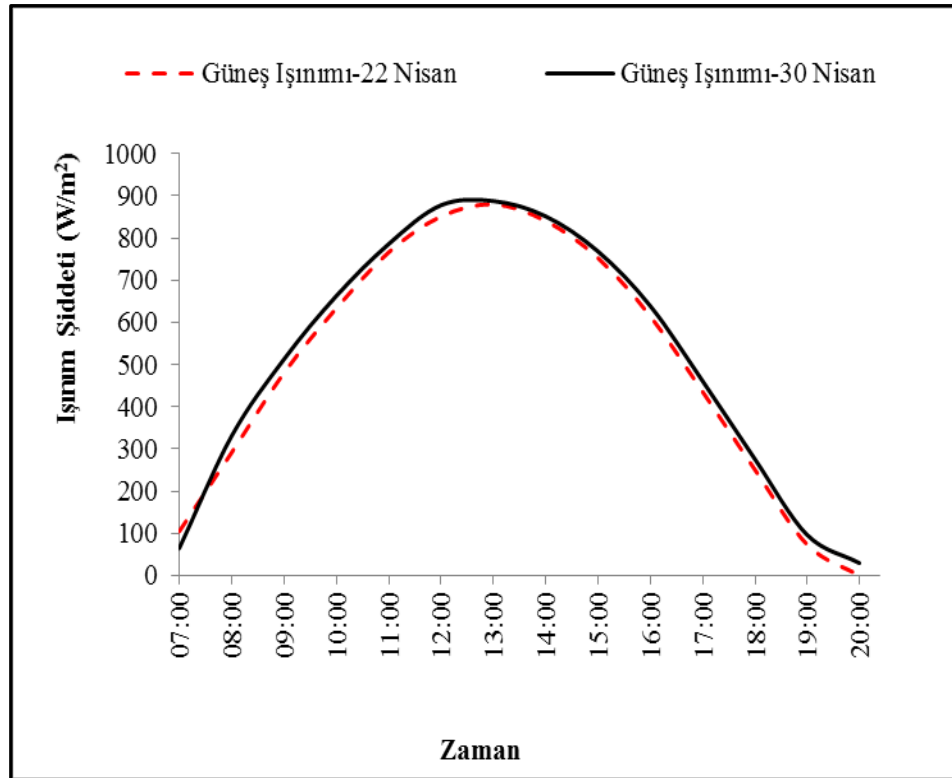


Şekil 6.16. Isı deposu kullanılmayan mekânda ısıtıcının çektiği elektrik gücü

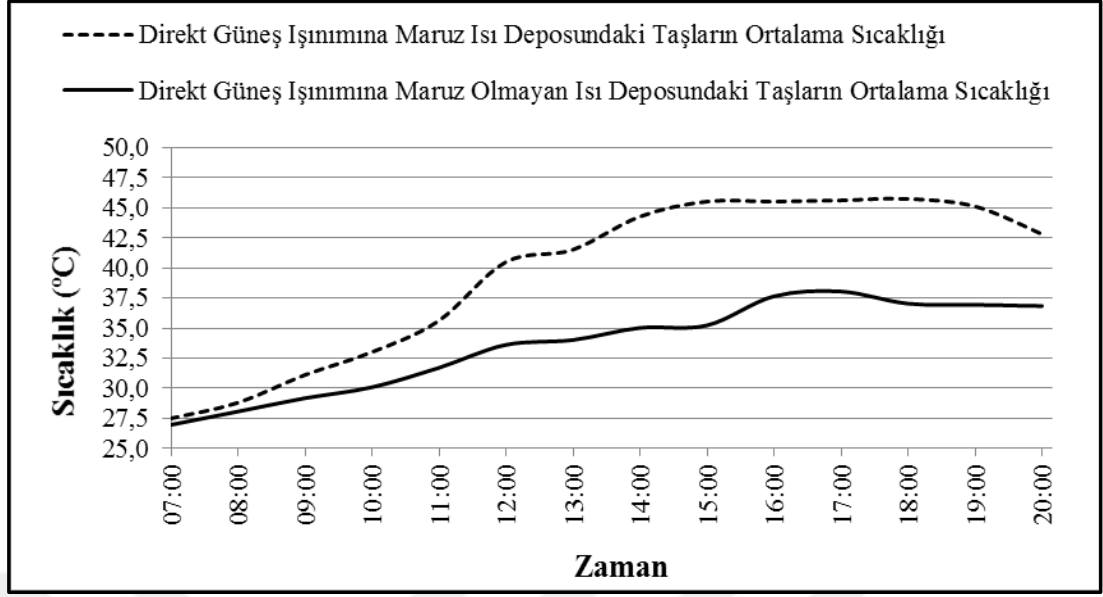
Tezin dördüncü bölümünde 4.4.2. başlığı altında anlatılmış olan deneyde ısı deposuna direkt güneş ışınımı etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneyde camlı olan güney cephe önce açık bırakılarak ölçümler yapılmış daha sonra bu yüzey kapatılarak deney tekrarlanmıştır. Böylelikle güneş ışınımının ne ölçüde depoyu etkilediği kıyaslanabilmiştir. Deneyler nisan ayında farklı günlerde yapılmıştır. Kıyaslamamanın doğru yapılabilmesi için ışınımın benzer olması gerektiğinden havanın açık ve güneşli olduğu iki gün seçilmiştir. Deneylerin yapıldığı günlere ait ışınım şiddeti değerleri Şekil 6.17’de verilmiştir. Güneş ışınımı gün boyunca 0 ile 887 W/m² arasında değişmekte olup iki gün için de birbirine yakın değerlerde ölçülmüştür.

Deney sonuçları Şekil 6.18’de verilmiştir. Direkt olarak güneş ışığı almayan ısı deposundaki taşların ortalama sıcaklığı, saat 07:00’de 27 °C’den başlamış ve 17:00’de 38 °C’ye ulaşabilmiştir. Direkt olarak güneş ışığı alan ısı deposundaki taşların ortalama sıcaklığı ise, saat 07:00’de 27,5 °C’den başlamış ve 17:00’de 45,6 °C’ye ulaşmıştır.

Isı deposunda depolanan enerji miktarları kıyaslandığında; direkt güneş ışınımına maruz ısı deposunda depolanan enerji miktarının direkt olarak güneş ışığı almayan ısı deposundan %11,7 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

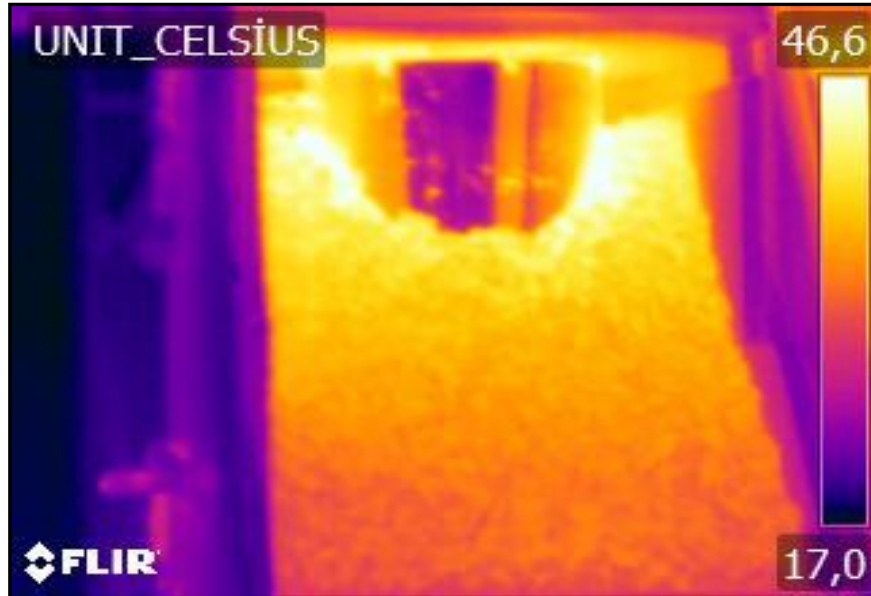


Şekil 6.17. Ölçülen güneş ışınımı değerleri



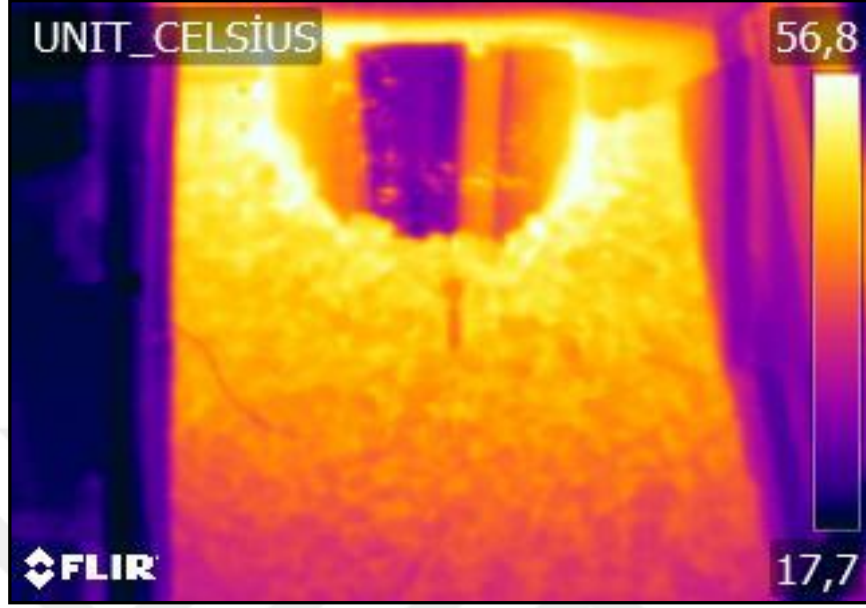
Şekil 6.18. Güneş ışığını direkt olarak alan ve almayan ısı deposundaki taşların ortalama sıcaklık değerleri

Isı deposuna güneş ışınımının etkisinin incelenmesi çalışmalarında yukarıdaki ölçümlere ek olarak güneşin etki ettiği yüzeyler termal kamera ile ölçülmüştür. Ölçümler camlı olan güney yönden yapılmıştır. Bu cephenin görüntüsü Bölüm 4'te Şekil 4.17'de verilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda; güney cephe kapatılarak direkt ışınımın olmadığı durumda, güneş görmeyen taşların sıcaklığının maksimum ulaştığı sıcaklığın, gün sonunda saat 20:00 itibariyle 46,6 °C olduğu görülmüştür (Şekil 6.19).



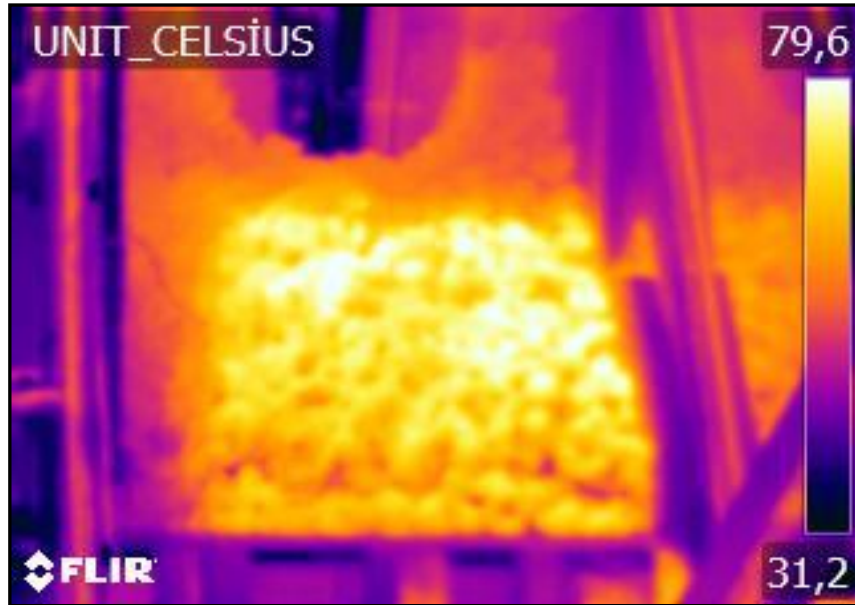
Şekil 6.19. Güneş ışınımının taşlara direkt temasının olmadığı gün sonunda (güneşlenme sırasında cam yüzey kapatılmıştır) saat 20:00 itibariyle termal kamera ile ölçülen sıcaklık değerleri

Güneş ışınımının taşlara direkt teması olduğu durumda ise gün sonunda, saat 20:00 itibariyle maksimum sıcaklık 56,8 °C olarak tespit edilmiştir (Şekil 6.20).



Şekil 6.20. Güneş ışınımının taşlara direkt temasının olduğu gün sonunda saat 20:00 itibariyle termal kamera ile ölçülen sıcaklık değerleri

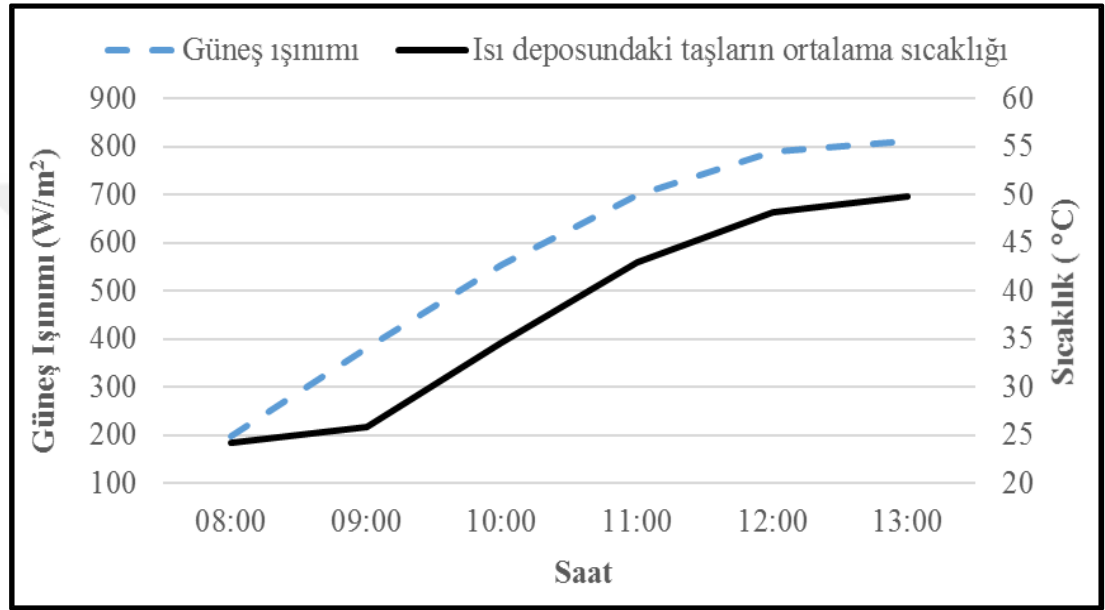
Güneşin taşlara direkt temas ettiği deneyde 1 saat arayla yapılan ölçümlerde güneşin en parlak olduğu saat 14:00'te bazalt taşı yüzey sıcaklığının maksimum 79,6 °C sıcaklığa kadar ulaşabildiği tespit edilmiştir (Şekil 6.21).



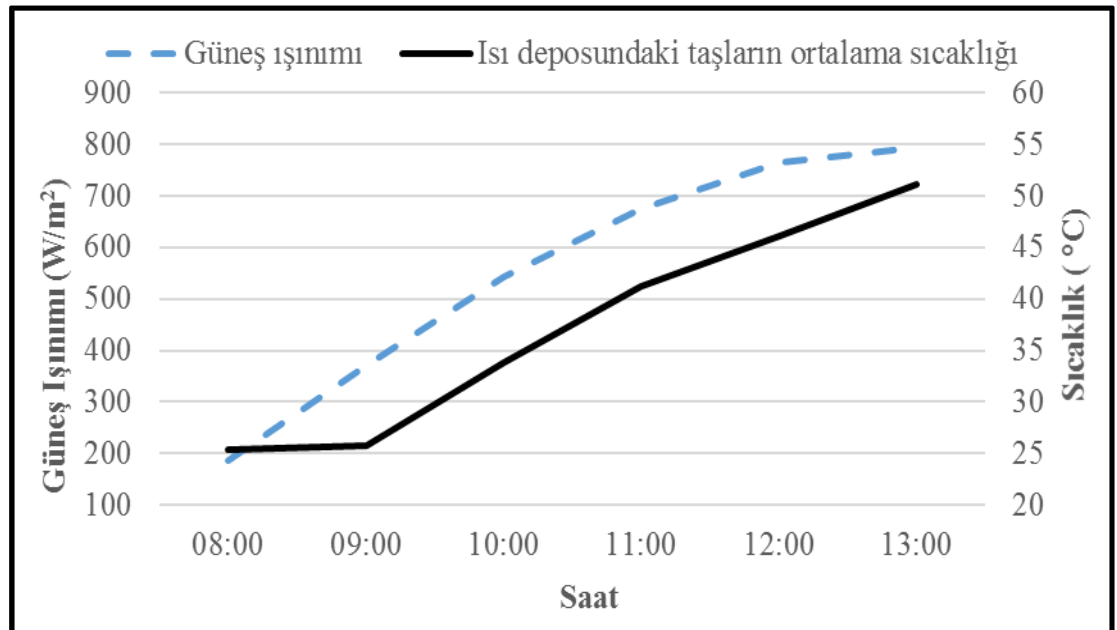
Şekil 6.21. Güneş ışınımının taşlara direkt temasının olduğu gün saat 14:00 itibariyle termal kamera ile ölçülen sıcaklık değerleri

6.4. Taşların Ortalama Sıcaklığının Denklemi ve Bulanık Mantıkla Modellenmesi

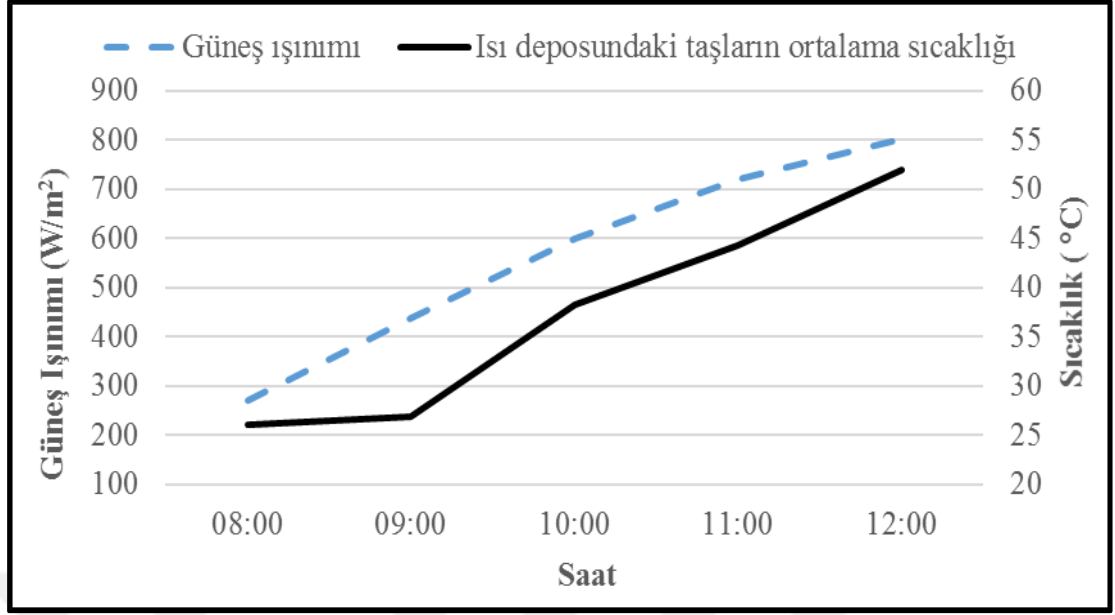
Isı deposundaki taşların ortalama sıcaklığı, deponun iki üst ve iki alt kısmından olmak üzere dört noktadan ölçülmüş ve bu dört sıcaklığın ortalaması alınmıştır. 2016 yılının nisan ayında yapılan ölçümlerde zamana bağlı güneş ışınlamı ve ısı deposu sıcaklıkları tespit edilmiştir. Şekil 6.22, Şekil 6.23 ve Şekil 6.24'te 5 Nisan, 7 Nisan ve 16 Nisan'da elde edilen değerler sırasıyla verilmiştir.



Şekil 6.22. Zamana bağlı güneş ışınlamı ve taşların ortalama sıcaklığı (5 Nisan 2016)



Şekil 6.23. Zamana bağlı güneş ışınlamı ve taşların ortalama sıcaklığı (7 Nisan 2016)



Şekil 6.24. Zamana bağlı güneş ışınımı ve taşların ortalama sıcaklığı (16 Nisan 2016)

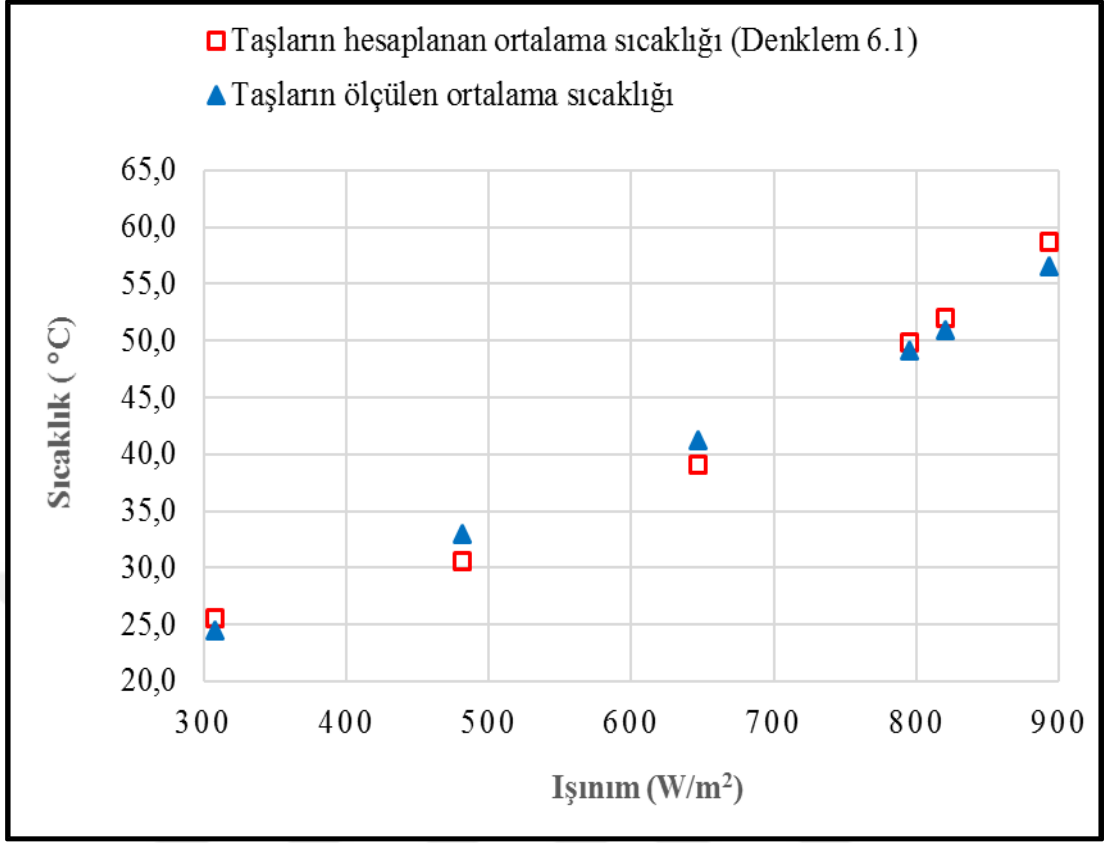
Elde edilen bu değerler kullanılarak, taşların ortalama sıcaklığının güneş ışınımına bağlı değeri için amprik denklem elde edilmiştir;

$$Y = 6,761 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 - 0,0246 \cdot I + 26,723 \quad (6.1)$$

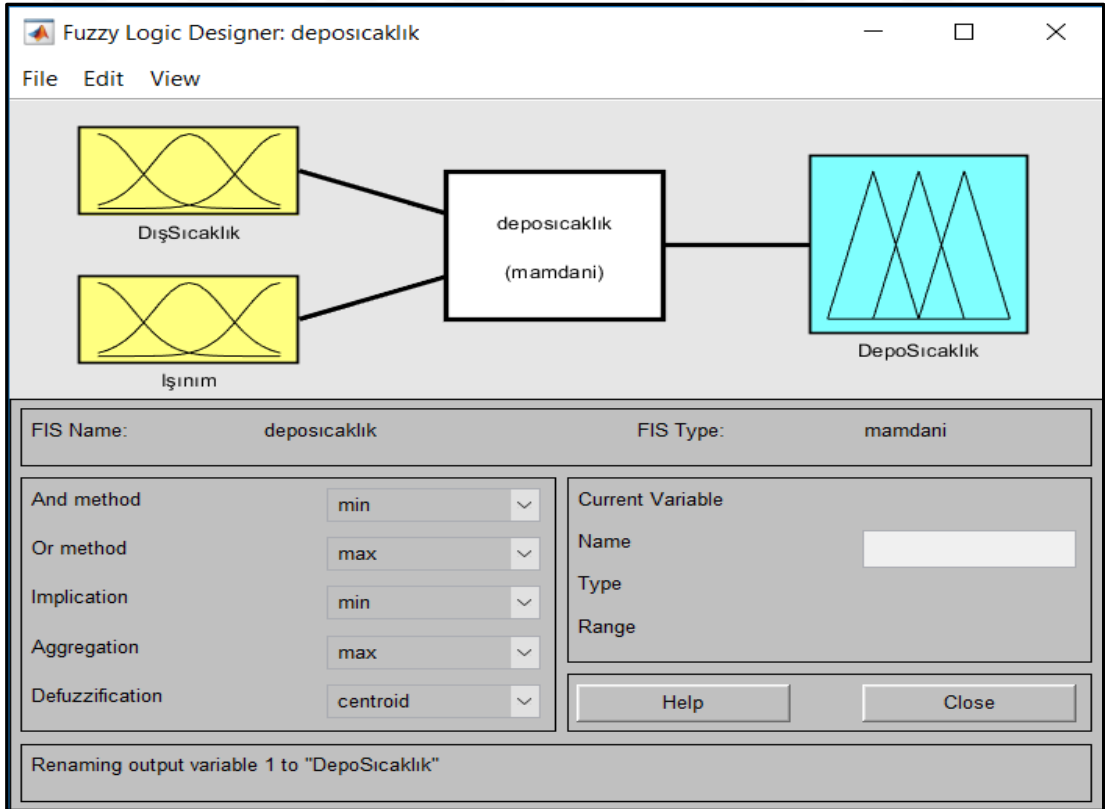
Denklem (6.1)'de; (I) Watt/m² biriminden güneş ışınımını, (Y) ise °C biriminden ısı deposundaki taşların ortalama sıcaklığını ifade etmektedir. Elde edilen denklem ile hesaplanan taşların ortalama sıcaklık değerleri ile 27 Nisan 2016 da yapılan ölçüm değerleri Şekil 6.25'te karşılaştırılmıştır.

Ayrıca tasarım, farklı bilim dallarında başarıyla uygulanan Bulanık Mantık yöntemiyle [75] modellenerek, ısı deposundaki taşların ortalama sıcaklığı ışınım ve dış sıcaklık değerlerine bağlı olarak elde edilmiştir. MATLAB programının Fuzzy Logic uygulaması kullanılarak en yaygın yöntem olan Mamdani yöntemine göre modelleme yapılmıştır. Model, iki girdi ve bir çıktı olacak şekilde tasarlanmıştır. Güneş ışınımı ve dış sıcaklık girdi, ısı deposundaki taşların ortalama sıcaklığı çıktı olarak tanımlanmıştır (Şekil 6.26).

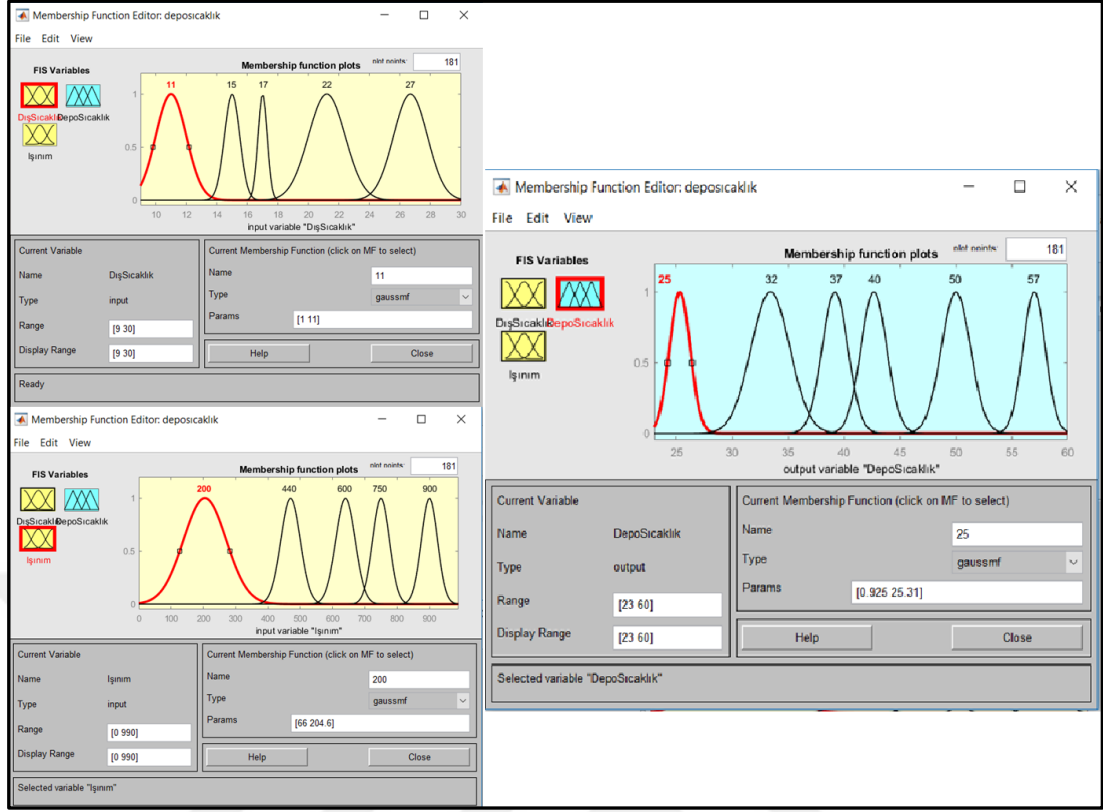
Sıcaklık girdisi için 9 ile 30 °C arasında olmak üzere 5 adet Gauss tipi üyelik fonksiyonu ve ışınım girdisi için 0 ile 990 W/m² aralığında değişen 5 adet Gauss tipi üyelik fonksiyonu tanımlanmıştır. Isı deposu sıcaklığı çıktısı için 23 ile 60 °C aralığında olmak üzere 6 adet Gauss tipi üyelik fonksiyonu tanımlanmıştır (Şekil 6.27).



Şekil 6.25. Güneş ışınımına bağlı olarak taşların ortalama sıcaklığının karşılaştırması



Şekil 6.26. Fuzzy Logic uygulamasında girdiler ve çıktı



Şekil 6.27. Fuzzy Logic uygulamasında tanımlanan üyelik fonksiyonları

Nisan ayı ölçüm sonuçlarının yararlanılarak ve bu ölçüm sonuçlarını yansıtacak 13 adet kural yazılmıştır. 27 Nisan 2016 tarihli güneş ışınımı ve dış sıcaklık değerleri kullanılarak ısı deposundaki taşların ortalama sıcaklık değerleri modelde tahmin edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar aynı gün yapılan ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Şekil 6.28’de bulanık mantıkla elde edilen sonuçlar ve deneysel ölçümden elde edilen sonuçlar görülmektedir. Değerlerin birbirine oldukça yakın olduğu ve maksimum 1,7 °C’lık bir fark olduğu görülmüştür. Modelin performanslarını değerlendirmek için karekök ortalama hata (KOH) değeri Denklem (6.2) kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca Minimum Ortalama Rölatif/Bağıl Hata (MRH) değerleri Denklem (6.3) ve determinasyon katsayısı (R^2) değerleri de Denklem (6.4) kullanılarak hesaplanmıştır.

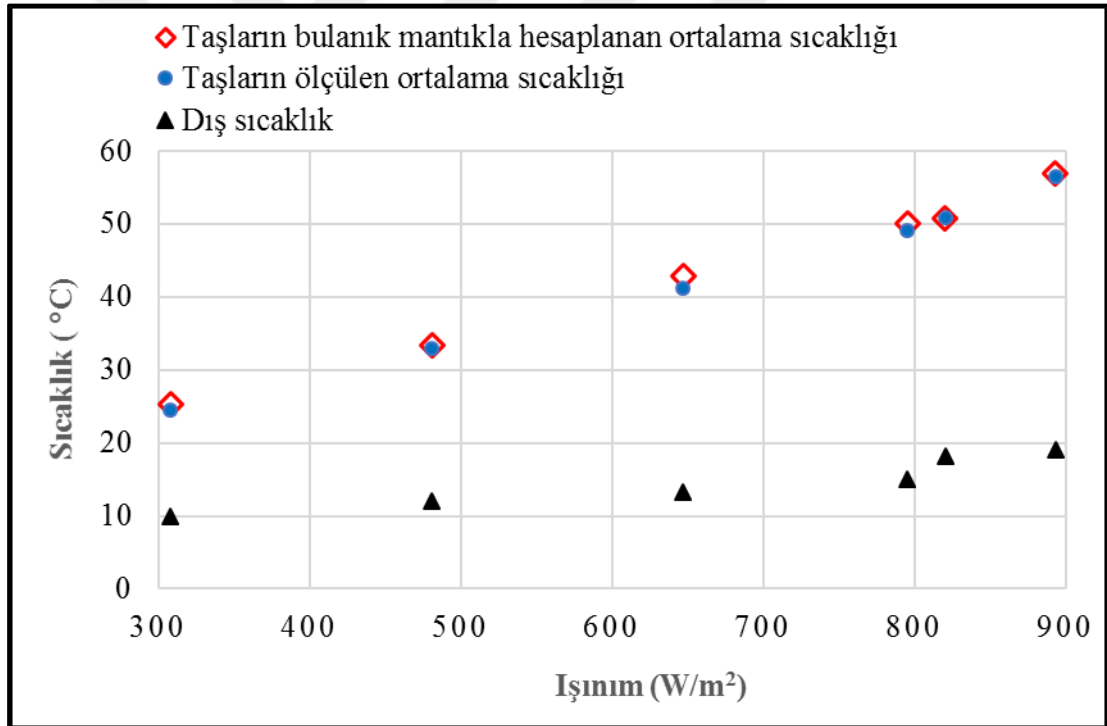
$$KOH = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_{i(\text{gerçek})} - f_{i(\text{model})})^2} \quad (6.2)$$

$$\%MRH = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|f_{i(\text{gerçek})} - f_{i(\text{model})}|}{f_{i(\text{gerçek})}} \cdot 100 \quad (6.3)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (f_{i(\text{gerçek})} - f_{i(\text{model})})^2}{\sum_{i=1}^n (f_{i(\text{gerçek})} - f_{i(\text{ortalama})})^2} \quad (6.4)$$

Burada; (n); tahmin edilen veri sayısını, ($f_{i(\text{gerçek})}$), taşların ortalama ölçüm sıcaklığını, ($f_{i(\text{model})}$) tahmin edilen/hesaplanan ortalama taş sıcaklığını, ($f_{i(\text{ortalama})}$) ise taşların ortalama ölçüm sıcaklık değerlerinin aritmetik ortalamasını ifade etmektedir.

KOH değeri bulanık model için 0,90 °C olarak hesaplanırken, sistem için elde edilen amprik Denklem (6.1) için 1,7 °C, MRH değeri bulanık model için %1,95, denklem için %4,09, R^2 değeri ise bulanık model için 0,9934, denklem için 0,9750 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç bulanık mantık yönteminin pek çok farklı alanda kullanıldığı gibi ısı depolama sistemlerinde sonuçların tahmininde de büyük kolaylıklar sağlayabileceğini göstermiştir.



Şekil 6.28. Güneş ışınımına ve dış sıcaklığa bağlı olarak taşların ortalama sıcaklığının karşılaştırması

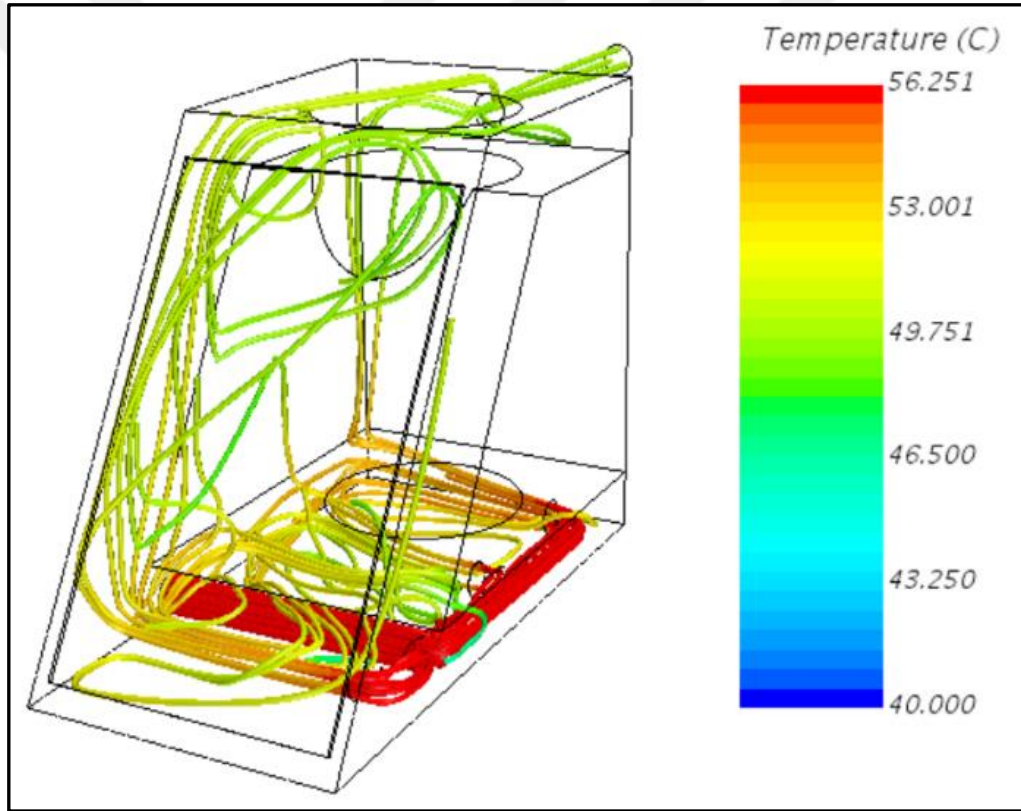
6.5. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) ile Elde Edilen Bulgular

Bu bölümde beşinci bölümde belirtilmiş olan model ve sınır şartları kullanılarak ısı deposundan elde edilen analiz sonuçları elde edilmiştir. Isı deposu içinde meydana

gelen akış, akım çizgileri ve hız vektörleri ile görselleştirilmiştir. Hız ve sıcaklık dağılımları görsel olarak verilmiştir.

6.5.1. Akım çizgileri ve sıcaklık dağılımları

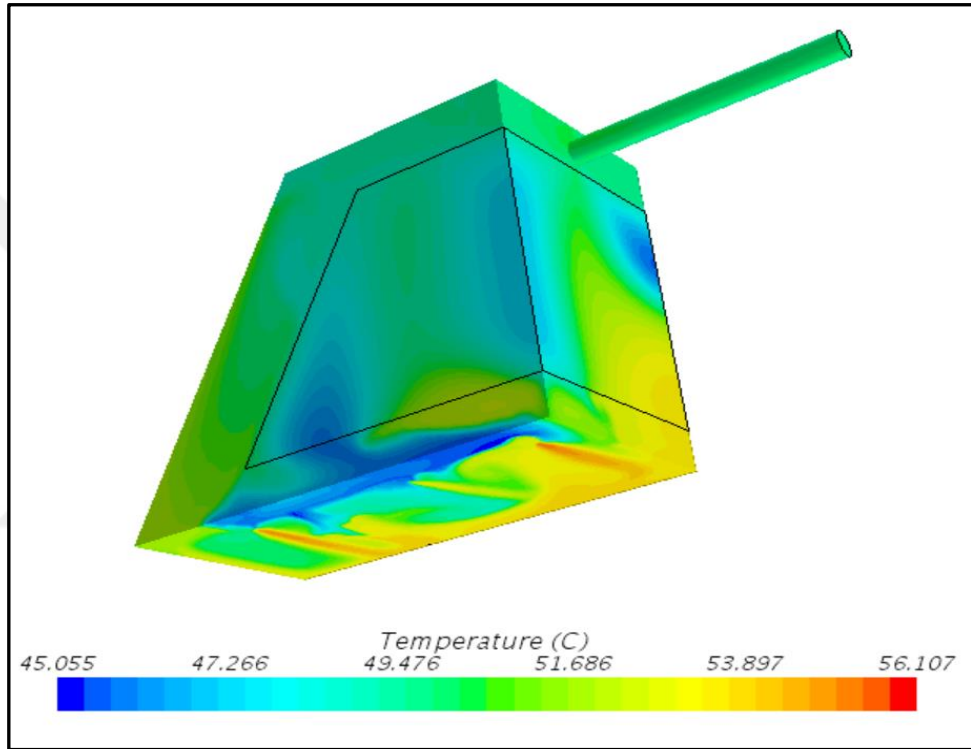
Akım çizgileri, akışkan hareketinin anlık durumlarını akış alanı boyunca göstermeleri açısından çok kullanışlıdır. Örnek olarak, akım çizgilerinin oluşturduğu desenler yardımıyla, sürekli dolanımlı olan akış bölgeleri ile akışkanın katı çeperden ayrılması kolayca tespit edilebilir. Akım çizgileri renkli ya da renksiz olabilmektedir. Akım çizgileri üzerinde basınç, sıcaklık ya da hız dağılımları görülebilmektedir [76]. Şekil 6.29'da akım çizgileri üzerinde sıcaklık dağılımları görülmektedir.



Şekil 6.29. Sıcaklık dağılımlarının görüldüğü akım çizgileri

Havanın büyük bir kısmı ısı deposunun ön kısmında bırakılan boşluktan geçerek ısı deposu içerisinde yükselmekte ve arka kısma doğru ilerleyerek ısı deposundan çıkmaktadır. Güneşin olduğu zamanlarda deponun eğimli yüzeyinden geçen hava (cam yüzey olması nedeniyle) burada da direkt güneş ışınımıyla ısınarak depo çıkışına yönelecektir. Bu durum güneşin olduğu zamanlar için olumlu olmakla birlikte güneşin olmadığı zamanlarda cam yüzeyin yalıtılmaması durumunda ısı kaybına yol

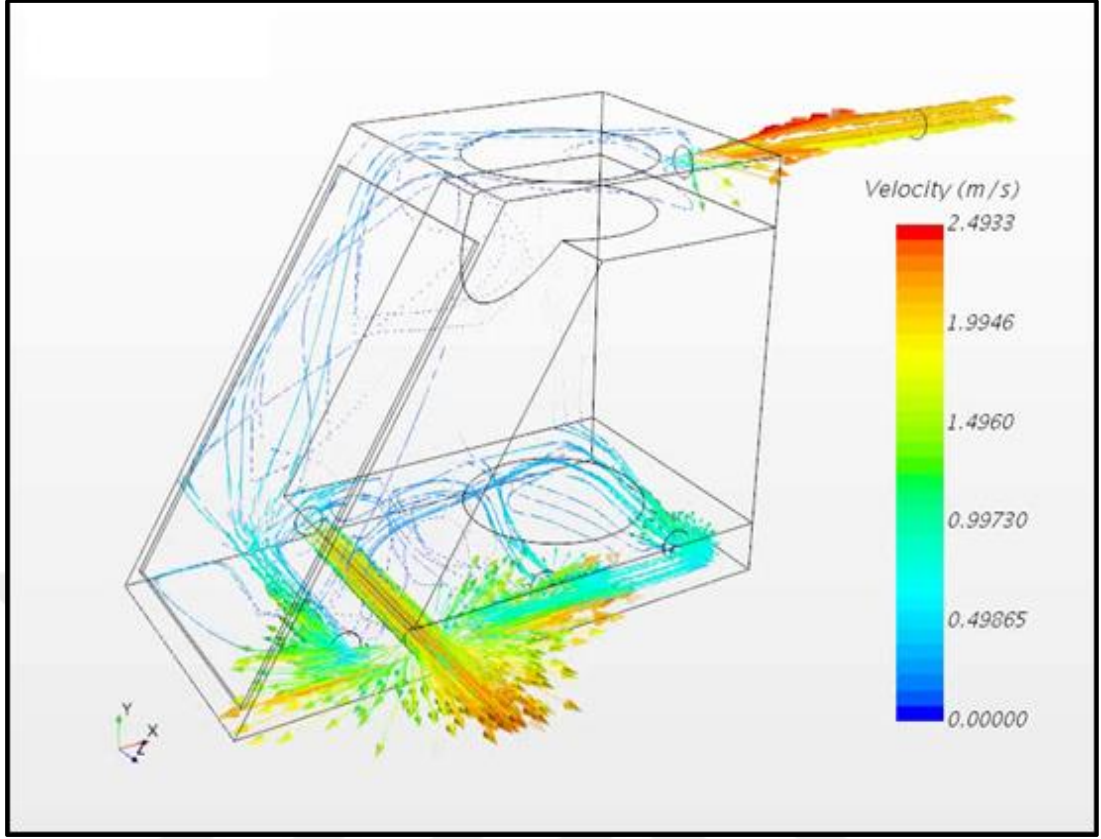
açabileceği değerlendirilmektedir. Havanın ön kısımdaki boşluğa gitmesinin engellenmesi durumunda hava taşlar arasından daha fazla geçecek ve ısı deşarjı daha iyi olacağı gibi cam yüzeyden ısı kaybı da önlenmiş olacaktır. Isı deposu içerisindeki sıcaklık dağılımları Şekil 6.30'da görülmektedir. Mavi renkle görülen bölgelerin diğer bölgelere göre daha az ısındığı analiz sonuçlarından tespit edilmiştir. Isı deposu içerisinde havanın çıkış noktalarının simetrik olarak ayarlanmasının ve daha fazla noktadan hava çıkışı verilmesinin uygun olacağı tespit edilmiştir.



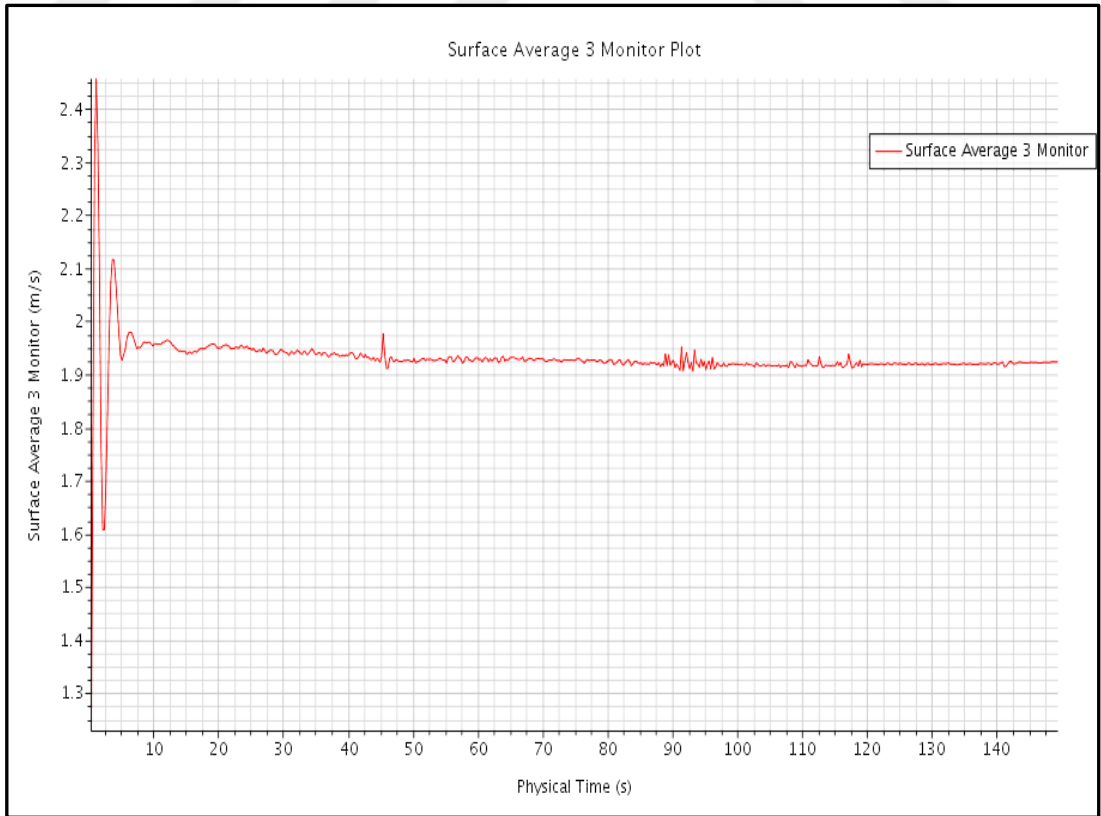
Şekil 6.30. Isı deposu içerisinde görülen sıcaklık dağılımları

6.5.2. Hız vektörleri

Hız vektörleri, akışkanın hem yönünü hem de şiddetini gösteren oklar dizisinden oluşmaktadır. Yapılan görselleştirme ile akış hareketini inceleme noktasında büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Yapılan model üzerinden ısı deposuna giren havanın hız vektörleri Şekil 6.31'de verilmektedir. 2 m/s hızla ısı deposuna giren havanın, yapılan analiz sonucunda ısı deposundan yaklaşık 1,9 m/s hızla çıktığı ve ısıtılan mekâna girdiği görülmektedir. Isı deposu çıkış hızı grafiği Şekil 6.32'de verilmektedir.



Şekil 6.31. Isı deposu hız vektörleri dağılımı



Şekil 6.32. Isı deposu çıkış hızı

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Bu çalışmada ısı depolama malzemesi olarak taşlar, su ve faz değiştiren madde kullanılarak güneş enerjisini termal enerji olarak depolayan bir ısı deposu tasarlanmış, imal edilmiş ve denenmiştir. Isı deposunda literatürdeki klasik, kapalı taş/kayaç depolama sistemlerinden farklı olarak güney cepheden güneş ışınımını direkt alacak biçimde cam örtü kullanılmıştır.

Isı deposu, taşların ortasına bir tank yerleştirilerek tasarlanmış, tank içerisine su ve faz değiştiren madde konulmuştur. Isı deposunda su ve faz değiştiren madde, su akışkanlığı güneş kolektörü ile taşlar ise hava akışkanlığı güneş kolektörü ile ısıtılmıştır. Klasik ısı depolamalarında tek akışkan (ya su ya da hava) ısı transferinde kullanılırken bu çalışmada hem hava hem de su ısı transfer akışkanı olarak ısı deposunu beslemektedir. Faz değiştiren madde ve suyun yüksek ısı tutma avantajı ile taşların temas yüzeyinin fazla olması sayesinde yüksek ısı transfer hızı avantajı birleştirilip ısı deposunun performansının artırılması hedeflenmiştir.

Yapılan deneylerde, tasarımı ve imalatı yapılan ısı deposunun performansı ve mekân ısıtmaya olan katkıları araştırılmıştır. Isı deposunda depolanan ısı enerjisinin deşarjı on iki metrekarelik mekâna yapılmış ve mekân ısıtması yapılmıştır. Birbirinin birebir aynısı olacak şekilde ısı yalıtımlı iki konteyner imal edilerek ısıtılacak mekan olarak bu çalışmada kullanılmıştır. Isı deposu içerisinde faz değiştiren madde olarak parafin wax kullanılmış ve ısı deposuna etkileri araştırılmıştır. Sonrasında ise direkt güneş ışınımının taşlara (bazalt taşı) teması olması durumundaki ısı deposuna etkileri araştırılmıştır.

Çalışmamızda sistem içerisinde yer alan ısı deposu hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) ile modellenerek analiz edilmiştir. Isı deposu içinde meydana gelen akış, akım çizgileri ve hız vektörleriyle görselleştirilmiştir. Hız ve sıcaklık dağılımları görsel olarak verilmiştir.

Isı deposu testleri yapılmış ısı deposu sıcaklığını hesaplayacak şekilde model oluşturulmuş ve deneysel olarak doğrulanmıştır. Test sonuçlarına göre, ısı deposu sıcaklığının güneş ışınımına bağlı denklemi elde edilmiştir. Bununla birlikte bulanık mantık yöntemiyle ısı deposu sıcaklığı modellenmiş ve deney sonucuyla doğrulanmıştır. Bunun için MATLAB programının Fuzzy Logic uygulaması kullanılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre;

Kullanılan hava akışkanlı güneş kollektöründe fan yardımıyla üflenen hava hızının 5 m/s olması durumunda sıcaklık değerlerinin 49 °C'lerde iken 2 m/s hava hızında 62 °C' ye kadar yükseldiği tespit edilmiştir. Bu hava hızının tasarlanan sistemde taşlara ısı yüklemek ve mekânı ısıtmak için en uygun hava hızı olduğu tespit edilmiştir.

Sistemde iki adet su akışkanlı güneş kollektörü kullanılmıştır. Söz konusu kollektörler düzlemsel kollektör olup 50-55 °C çıkış sıcaklıklarına ulaşabildikleri görülmüştür. Kollektörden çıkan sıcak su, ısısını ısı deposu içerisindeki 400 litre su ve 50 litre parafin waxa aktarıp tekrar kollektöre dönmektedir. Giriş ve çıkış sıcaklığı arasında ortalama 2 °C'lik sıcaklık farkı olduğu görülmüştür. Türkiye şartlarında üretilen su akışkanlı kollektörlerde son zamanlarda vakum tüplü olanlar kullanıldığı ve daha verimli oldukları görülmüştür. Bundan sonraki deneysel çalışmalarda vakum tüplü kollektörler kullanılması durumunda daha yüksek sıcaklıklara çıkılabilir.

Mekândaki havanın ısı deposundan geçirilerek ısının ısı deposundan alınıp odaya aktarılması (deşarj) edilmesi incelenmiş olup odanın ısıtılabilmesi için bu sistemde ısı deposu sıcaklığının, ısıtılacak odadan en az 10-12 °C daha yüksek sıcaklıkta olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Isı deposundan ısıtılan mekânın hiç ısıtılmayan eş mekâna göre 4,4 °C daha sıcak olduğu tespit edilmiştir. Yapılan deneylerde tasarlanan ısı deposunun, güneş battıktan sonra (saat 20:00'den) sabah güneş doğana (saat 07:00'ye) kadar mekânın ısıtması için gereken enerjinin %15-%50 arasında ısı deposundan sağlanabildiği sonucuna varılmıştır.

Isı deposunda faz değiştiren madde kullanılmasının ısı deposuna etkisinin araştırılması sonucunda; parafin wax depoya konulduktan sonra tank sıcaklığının kullanılan parafin waxın erime sıcaklığı olan 46 °C'ler civarında sabit kaldığı yine ısı deposu sıcaklığının da daha uzun süre sıcaklığını muhafaza ettiği tespit edilmiştir. Faz değiştiren madde ile desteklenen ısı deposundan daha uzun süre faydalanmanın mümkün olabileceği ve %9,9 daha fazla enerji depolanabileceği tespit edilmiştir.

Isı deposunun güney cephesi Kocaeli kış şartları için 56 derece eğimli ve çift camlı olarak tasarlanmıştır. Böylelikle ısı deposunun güney cepheden direkt güneş ışınımıyla da ısınması sağlanmıştır. Güneş ışınımının etkisini tespit etmek maksadıyla güney cephe kapalı iken ve açıkken karşılaştırma deneyleri yapılmıştır. Termal kamera ile de direkt ışınım alan yüzeyin sıcaklığı ölçülmüştür. Sonuç olarak; güney cephe kapatılarak direkt ışınımın olmadığı durumda güneş görmeyen taşların sıcaklığının gün sonunda maksimum ulaştığı sıcaklığın saat 20:00 itibariyle 46,6 °C olduğu, güneş ışınımının taşlara direkt teması olduğu durumda ise gün sonunda saat 20:00 itibariyle maksimum sıcaklığın 56,8 °C olduğu tespit edilmiştir. Direkt güneş ışınımı alan ısı deposunun almayan ısı deposuna göre daha yüksek sıcaklığa ulaşabildiği ve %11,7 daha fazla enerji depolayabildiği tespit edilmiştir.

Mekân ısıtmaları için bazalt taşlarının kullanılabileceği ve Türkiye'de yaygın kullanıma sahip olan kullanma suyu ısıtmasının bu tür bir tasarımlarla entegre edilerek mekân ısıtmasında da faydalanabileceği sonucuna varılmıştır.

Klasik uygulamalarda kapalı olarak (direkt güneş ışınımı almadan) taşlarda/kayaçlarda ısı depolanmakta olup direkt güneş ışınımı verilmemektedir. Bu çalışmayla güneş ışınımının etkileri incelenmiş olup cam yüzeylerin depolama sonrasında yalıtılarak ısı kaybını önleyecek şekilde tasarlanmasının da önemli olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan tasarımda ısı deposunda (bazalt taşlarında) ortalama olarak 45-55 °C sıcaklıklara ulaşılabılmıştır. Bu haliyle mekân ısıtmalarında kullanılabileceği bununla birlikte daha yüksek sıcaklıklara ulaşmak için (75-80 °C) yeni tasarımlar yapılması gerektiği değerlendirilmektedir.

Faz değiştiren madde kullanımı için yapılan çalışmalarda ve yapılan incelemelerde bu tasarım için 30-50 °C aralığında erime noktasına sahip maddeler kullanılabileceği

ancak ısı depolamasından maksimum fayda sağlayabilmek için mümkün olan en düşük erime noktasına sahip (30 °C ye en yakın) faz değiştiren maddelerin kullanılması gerektiği değerlendirilmiştir. Ticari olarak ülkemizde bu aralıklarda faz değiştiren madde temininde zorluklar yaşandığı görülmüş olup bu alanda çalışmaların yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

7.2 Öneriler

Yapılan alışmalar sonucunda tasarımı ve imalatı yapılan termal ısı depolama sisteminin geliştirilmesi ve bu konuda yapılabilecek çalışmalar şunlardır;

Isı deposu daha geniş alanda güneş alacak şekilde tasarlanabilir, üst yüzeyden de güneş alacak şekilde ya da yuvarlak olacak şekilde, küresel vb. olarak tasarlanıp güneşi direkt alma yüzeyi mümkün olduğunca genişletilerek tasarımlar geliştirilebilir. Tasarımda depolama sonrası güneşlenme için şeffaf olan yüzeylerin güneşin olmadığı durumlarda yalıtılacak şekilde geliştirilmesi gerekmektedir.

Isı depolama için yüksek ısı kapasitesine sahip yeni kayaçlar/taşlar ve bunlarla yapılacak alaşımlar için taşlar/kayaçlar konusunda uzman kişilerle enerji alanında uzman kişilerin ortak çalışması ve farklı malzemelerle karşılaştırma çalışmaları yapılabilir.

Isı depolanması sırasında, ısı deposu sıcaklığı maksimum değere ulaştıktan sonra depoya gönderilen ısı transfer akışkanların (su ya da hava) ısı deposunun altında sıcaklığa düştükten sonra ısı deposuna ısı şarjı kesilmelidir. Bu sıcaklıktaki akışkanlar mekân ısıtmasına elverişli ise orada kullanılmalıdır. Sıcaklık durumuna göre ayarlamalar yaparak havayı gerekli yere iletcek otomatik kontrol sistemleriyle ısı deposunun daha fazla enerji depolaması sağlanabilir. Kollektör hava hızının otomatik olarak ayarlanabilmesi de mekân ısıtması-ısı depolaması sistem optimizasyonunu sağlayacak bir çalışma olabileceği düşünülmektedir.

Kayaçlarda/taşlarda ısı depolamada önemli sorunlardan bir tanesi ısı deposunda oluşabilecek nem konusudur. Bu sistemde bazalt ve diğer kayaç/taşlar için nem ölçümleri de depo içerisinde yapılarak çalışma geliştirilebilecektir.

Taşlar/kayaçlar yüksek sıcaklıklarda ısı depolama özelliğine sahip ısı depolama malzemeleri olup akışkanları daha yüksek sıcaklıklara çıkarabilecek hava akışkanlı kollektör geliştirilerek ve/veya taşlara güneşi odaklayarak yansıtma yöntemiyle taş sıcaklığı yüksek değerlere çıkarılabilir. Böylelikle mekân ısıtmada gereken termal enerjiden daha verimli bir şekilde yararlanılabilecektir.

Söz konusu ısı deposu mekân ısıtma için kış şartlarına göre dizayn edilmiş olup, seracılıkta ve meyve-sebze kurutmada da kullanılabilecek yapıdadır. Yaz şartlarına göre dizayn edilerek bu alanda da kullanılması ve gerekli performans testlerinin yapılması önerilmektedir.

Tasarlanan ısı deposu Kocaeli ilinde performans testlerine tabi tutulmuş olup, güneşlenme süresi ve güneş ışınımı potansiyeli çok daha fazla olan kış mevsiminde havanın soğukluğuna rağmen güneşin ışınımının etkili olduğu Konya, Van gibi şehirlerimizde bu tür tasarımların gerçekleştirilerek çalışmaların yapılmasının önemli olduğu değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Varınca K. B., Gönüllü, M. T., Türkiye’de Güneş Enerjisi Potansiyeli ve Bu Potansiyelin Kullanım Derecesi, Yöntemi ve Yaygınlığı Üzerine Bir Araştırma, *GHEK’2006: I. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi*, Eskişehir, Türkiye, 21-23 Haziran 2006.
- [2] Enerji Bakanlığı web adresi, Bilgi, Güneş; <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Gunes>, (Ziyaret tarihi: 21.03.2018).
- [3] Türkiye Elektrik İletim A.Ş. web adresi, Kurulu güç; <https://www.teias.gov.tr/sites/default/files/2018-01/Kguc2017.pdf> , (Ziyaret tarihi: 03.02.2018).
- [4] Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü, Yenilenebilir Enerji; http://www.eie.gov.tr/yenilenebilir/g_enj_tekno.aspx, (Ziyaret tarihi: 21.03.2018).
- [5] Alan C., Tuna F., Türkiye’nin Güneş Enerjisi Potansiyeli Üzerine Bir İnceleme: Freiburg\Almanya Karşılaştırılması, *Türkiye Coğrafyacılar Derneği Yıllık Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 19-21 Haziran 2013.
- [6] Boz O. H., Günümüzün Alternatif Enerji Kaynağı: Fotovoltaik Güneş Pilleri, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2011, 282925.
- [7] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı web sayfası, Bilgi Merkezi; <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Gunes>, (Ziyaret tarihi: 24 Şubat 2019)
- [8] Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası; <http://www.yegm.gov.tr/MyCalculator/Default.asp> (Ziyaret tarihi: 25 Aralık 2018)
- [9] Şenol R., Güneş Kulelerinden Elektrik Enerjisi Üretiminin Araştırılması ve Optimizasyonu, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2009, 258976.
- [10] Bayrak F., İçerisinde Gözenekli Engeller Bulunan Hava Isıtmalı Güneş Kollektörünün Performans Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ, 2011, 292732.
- [11] Gökpınar N., Yenilenebilir Enerji Ekonomisi: Türkiye (Modelleme), İsrail ve İspanya Örneği, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Adana, 2010, 294425.

- [12] Sandal B., Güneş Enerjili Konut Isıtma Sistemlerinin F-Grafik Yöntemi ile Optimum Boyutlandırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006, 182486.
- [13] Beckman W. A., Klein J.A., Duffie J.A., Solar Heating Design by the f-Chart Method, *Wiley Interscience*, 1977, 1, 214.
- [14] Öztürk H., *Isı Depolama Tekniği*, 1.Baskı, Teknik Yayınevi, Ankara, 2008.
- [15] Esgel H., Kordiyerit Esaslı Seramik Malzemeden Yapılmış Termal Enerji Depolama Sisteminin Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul, 2014, 372522.
- [16] Arda K., Güneş Enerjisinin Depolanması ve Isıl Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2006, 197291.
- [17] Aydın D., Yenilenebilir Enerji Kaynaklı Birleşik Isıtma Sisteminde Gizli Isı Deposunun Ekserji Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2013, 343807.
- [18] Dinçer İ., Thermal energy storage and phase-change materials, *Course on Porous Media*, Evora, Portugal, 17-21 June 2002.
- [19] Günerhan H., Duyulur Isı Depolama ve Bazalt Taşı, MMO web sayfası, http://www.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/2fc990265c712c4_ek.pdf?dergi=60, (Ziyaret tarihi: 31 Mart 2018).
- [20] Örengül F., Gizli Isı Depolamalı Tavan Isıl Yalıtımının Deneysel Olarak Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ, 2010. 269970.
- [21] Yılmaz S., Soğutma Uygulamaları İçin Faz Değiştiren Maddelerde Termal Enerji Depolama, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2008, 178109.
- [22] Kurt S., Yeni Nesil Bina Malzemeleri İçin Faz Değiştiren Madde Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2012, 304674.
- [23] Karaipekli A., Faz Değişimli Enerji Depolama Maddelerinde Isıl İletkenliğin Zenginleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat, 2006, 182031.
- [24] Mazman M., Gizli ısı depolaması ve uygulamaları, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2006, 183617.
- [25] Köse M., Trombe Duvarın Ekonomik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2013, 324719.

- [26] Çalış A. İ., Kaya Yataklı Ayrımlanmış Kazanç Sistemlerinin Teorik ve Deneysel Isıl Analizi, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2009, 256117.
- [27] Massachusetts Institute of Technology MIT Solar Decathlon Team, History; <http://web.mit.edu/solardecathlon/solar1.html>, (Erişim tarihi: 19 Ocak 2018).
- [28] Demirbilek F. N., Yalçiner U. G., Ecevit A., Özgümüş, M., METU Solar House, *The Proceedings of Solar 97. Canberra: Australian and New Zealand Solar Energy Society*, Canberra, 2-4 December 1997.
- [29] Uğur F., Hangar Tipi Yapılarda Pasif Güneş Enerjisi Kullanımına Yönelik Hava Kolektörü Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2010, 256051.
- [30] Haberler.com isimli haber sitesi, 20 Haziran 2008 tarihli ve “İlk 'Güneş Evi' Diyarbakır'da” başlıklı haber; <https://www.haberler.com/ilk-gunes-evi-diyarbakir-da-haberi/> (Erişim tarihi: 20 Nisan 2018).
- [31] Duffie J. A., Beckman W.A., *Solar Engineering Of Thermal Processes*, 2nd ed., John Wiley and Sons, New York, 1991.
- [32] Schmidt F. W., Willmot A.J., *Thermal Energy Storage and Regeneration*, McGraw-Hill Book Co, 1981.
- [33] Coutier P. J., Farber E. A., Two applications of a numerical approach of heat transfer process within rock beds, *Solar Energy*, 1982, **29**(6), 451-462.
- [34] Sagara K., Nakahara N., Thermal performance and pressure drop of rock beds with large storage materials, *Solar Energy*, 1991, **47**(3),157-163.
- [35] Hasnain S. M., Review on sustainable thermal energy storage technologies. Part1. Heat storage materials and techniques, *Energy Converse Manager*, 1998, **39**(11),1127-38.
- [36] Crandall D. M., Thacher E.F., Segmented thermal storage, *Solar Energy*, 2004,**77**(4), 435-440.
- [37] Sethi, V.P., Sharma, S.K., Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. *Solar Energy*, 2008, **82**, 832-859.
- [38] Singh, R., Saini R.P., Saini J.S., Simulated Performance of Packed Bed Solar Energy Storage System Having Storage Material Elements of Large Size Part 1, *The Open Fuels&Energy Science Journal*, 2008, **1**, 91-96.
- [39] Mawire, A., McPherson, M., van den Heetkamp, R.R.J., and Mlatho, S.J.P., Simulated performance of storage materials for pebble bed thermal energy storage (TES) systems. *Applied Energy*, 2009, **86**, 1246-1252.

- [40] Hänchen, M., Brückner, S., and Steinfeld, A., High-temperature thermal storage using a packed bed of rocks-heat transfer analysis and experimental validation, *Applied Thermal Engineering*, 2011, **31**, 1798-1806.
- [41] Zanganeh, G., Pedretti, A., Zavattoni, S., Barbato, and M., Steinfeld, A., Packed-bed thermal storage for concentrated solar power Pilot-scale demonstration and industrial-scale design, *Solar Energy*, 2012, **86**, 3084-3098.
- [42] Tian Y., Zhao, C.Y., A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications, *Applied Energy*, 2013, **104**, 538-553.
- [43] Yaïci W., Ghorab M., Entchev E., Hayden S., Three-dimensional unsteady CFD simulations of a thermal storage tank performance for optimum design, *Applied Thermal Engineering*, 2013, **60**, 152-163.
- [44] Zavattoni S.A., Barbato M.C., Pedretti A., Zanganeh G., Steinfeld A., High temperature rock-bed TES system suitable for industrial-scale CSP plant – CFD analysis under charge/discharge cyclic conditions, *Energy Procedia*, 2014, **46**, 124-133.
- [45] Bouadila S., Kooli S., Lazaar M., Skouri S., Farhat A., Assessment of The Greenhouse Climate with A New Packed-Bed Solar Air Heater at Night in Tunisia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, **35**, 31-41.
- [46] Bruch A., Fourmigue J.F., Couturier R. and Molina S., Experimental and numerical investigation of stability of packed bed thermal energy storage for CSP power plant, *Energy Procedia*, 2014, **49**, 743-751.
- [47] Zanganeh, G., Commerford, M., Haselbacher, A., Pedretti, A., Steinfeld, A., Stabilization of the outflow temperature of packed-bed thermal energy storage by combining rocks with phase change materials. *Applied Thermal Engineering*, 2014, **70**, 316-320.
- [48] Schlipf, D., Schicktanz, P., Maier, H., Schneider, G., Using sand and other small grained materials as heat storage medium in a packed bed HTTESS, *Energy Procedia*, 2015, **69**, 1029-1038.
- [49] Erregueragui, Z., Boutammachte, N., Bouatem, A., Merroun, O. , Zemmouri, E.M, Packed-bed Thermal Energy Storage Analysis: Quartzite and Palm-Oil Performance, *Energy Procedia*, 2016, **99**, 370-379.
- [50] Warkhade, G.S., Babu, A.V., Mane, S., and Babu, K.G., Experimental investigation of sensible thermal energy storage in small sized, different shaped concrete material packed bed, *World Journal of Engineering*, 2016, **13**(5), 386-393.
- [51] Cascetta M., Cau G., Puddu P. and Serra F., A comparison between CFD simulation and experimental investigation of a packed-bed thermal energy storage system, *Applied Thermal Engineering*, 2016, **98**, 1263-1272.

- [52] Atalay H., Çoban M. T., Kincay O., Modeling of the drying process of apple slices: Application with a solar dryer and the thermal energy storage system, *Energy*, 2017, **134**, 382-391.
- [53] Jemmal, Y., Zari, N., and Maaroufi, M., Experimental characterization of siliceous rocks to be used as filler materials for air-rock packed beds thermal energy storage systems in concentrated solar power plants, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017, **171**, 33–42.
- [54] Bouhal T., Fertahi S., Agrouaz Y., Rhafiki T.E., Kousksou T., Jamil A., 2017, Numerical modeling and optimization of thermal stratification in solar hot water storage tanks for domestic applications: CFD study, *Solar Energy*, 157: 441-455.
- [55] Swami V.M., Autee, A.T., Anil T.R., Experimental analysis of solar fish dryer using phase change material, *Journal of Energy Storage*, 2018, **20**, 310-315.
- [56] Khaldi S., Korti A. N., Abboudi S., Applying CFD for Studying the Dynamic and Thermal Behavior of an Indirect Solar Dryer: Parametric Analysis, *Mechanics and Mechanical Engineering*, 2018, **22**(1), 253-272.
- [57] Bulut H., Durmaz A. F., Havalı Güneş Kollektörünün Tasarımı, İmalatı Ve Deneysel Analizi, *I. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi*, Eskişehir, Türkiye, 21-23 Haziran 2006.
- [58] Benli H., Isı Depolamalı Cam Seralarda Sıcaklık Değişiminin İncelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ, 2006, 185946.
- [59] Karaçavuş B., Güneş Enerjisinin Sürekli Kullanılabilirlik Koşulu Altında Maddelerin Spesifik Isı Kapasitelerinin Kullanılarak Depolanabilirliğinin Araştırılması, Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, 2006, 183883.
- [60] Gürtürk M., Depo Kısmında Faz Değiştiren Madde Bulunan Güneş Enerjili Su Isıtma Sisteminin Tasarımı ve Isıl Performansının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ, 2011, 284731.
- [61] Aslan O., Faz Değiştiren Malzemelerle Güneş Enerjisinin Depolanması, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2014, 367780.
- [62] Akhan H., Kılcal Borulu Hava Sızdırmalı Güneş Toplayıcılarının Teorik ve Deneysel İncelenmesi, Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, 2015, 382468.
- [63] Elicent Firması web sayfası, Elicent ürün kataloğu; <https://www.elicent.it/content/uploads/2018/04/AXC-16-5-18.pdf> (Erişim tarihi: 27 Nisan 2018).

- [64] Texas A&M University web sayfası, Physical properties of basalt, http://www-odp.tamu.edu/publications/192_IR/chap_07/c7_8.htm, (Erişim tarihi: 27 Nisan 2018).
- [65] Baytaş, A. C., Gözenekli ortamlarda taşınım olayı, *İTÜ Dergisi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2006, **4**(1), 3-13.
- [66] Kulga İ. B., Gözenekli Ortam Ve Komşu Akışkan Tabakadan Oluşan Bileşik Sistemde Akışın Analitik Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010, 268037.
- [67] Beaujardiere, J-F. P. P., Backströmb T. W., Reuter H.C.R., Applicability of the local thermal equilibrium assumption in the performance modelling of CSP plant rock bed thermal energy storage systems, *Journal of Energy Storage*, 2018, **15**, 39–56.
- [68] Yılmazoğlu M. Z., Isı Enerjisi Depolama Yöntemleri ve Binalarda Uygulanması, *Politeknik Dergisi*, 2010, **13**(1), 33-42.
- [69] Mumma S. A., Marvin W. C., A Method of Simulating the Performance of a Pebble Bed Thermal Energy Storage and Recovery Systems, *ASME/AICHE National Heat Transfer Conference*, St. Louis, 9-11 August 1976.
- [70] Atalay H., Çoban T., Kincay O., Çakıl Taşı Yatağı Enerji Depolama Sisteminin Modellenmesi, *12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, 8-11 Nisan 2015.
- [71] Kocaman C., Gemi Formlarının CFD Kullanarak Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010, 296928.
- [72] Başyazıcı İ. U., HVAC Sektöründe Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Teknolojisinin Kullanımı, *TTMD Dergisi*, 2006, **44**, 33-38.
- [73] Yücel A., Ters Basınç Gradyanı Altında Bulunan Türbülanslı Sınır Tabakanın Aktif Kontrolünün Deneysel Ve Sayısal İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2017, 496483.
- [74] Kirişçi V., Osman Gazi Köprüsüne Etkiyen Rüzgâr Yüklerinin Had Metodu ile İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2016, 438144.
- [75] Zadeh L. A., Fuzzy Sets, *Information and Control*, 1965, **8**, 338-353
- [76] Celtek M.S., Engin T., 2 Kanatlı Radyal Tipteki Bir Çamur Pompası Çarkının Optimizasyonu Ve Analizi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi.*, 2013, **17**(2), 231-239.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Üçler K.**, Konukman, A.E.Ş., PEM Yakıt Pili İçin Buhar Reformasyonu ile Hidrojen Üreten Sistemin Chemcad Süreç Simülatörü ile Modellenmesi ve Bu Sistemden Isı ve Güç Entegrasyonu ile Enerji Geri Kazanımı, *17. Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi*, Sivas, 24-27 Haziran 2009.
- [2] **Üçler K.**, Kibar A., Karabağ B., Yiğit K.S., Mekân İçerisinde, Pencere Altında Bulunan Radyatörlerin Etrafına Yerleştirilen Engellerin Deneysel Olarak İncelenmesi, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2015, **12**(4), 61-69.
- [3] **Üçler K.**, Kibar A., Yiğit K.S., Güneş Enerjisinin Termal Olarak Depolanması İçin Isı Deposu Tasarlanması ve Bu Depoya Direk Güneş Işınımının Etkisi, *3. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi*, Kocaeli, 4-5 Mayıs 2018.
- [4] **Üçler K.**, Yiğit K.S., Yeğın E.M., Kibar A., Güneş Enerjisinin Termal Olarak Depolanmasının Deneysel Olarak İncelenmesi, *International Conference on Multidisciplinary, Science, Engineering and Technology*, Dubai 25-27 Ekim 2018.

ÖZGEÇMİŞ

Kemal ÜÇLER, 1979 yılında Konya’da doğdu. 1998 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümünde başladığı lisans eğitimini 2003 yılında tamamladı. 2008 yılında Gebze Teknik Üniversitesi, Enerji Sistemleri Anabilim Dalında yüksek lisansını tamamladı. 2005 yılında Düzce Bayındırlık ve İskân Müdürlüğü’nde Makine Mühendisi olarak göreve başladı. 2007 yılından 2012 yılına kadar Kocaeli Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü’nde Makine Mühendisi ve 2012-2015 yılları arasında İl Müdür Yardımcısı olarak görev yaptı. 2016 yılında Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi’ne İç Denetçi olarak atandı ve görevine devam etmektedir.

